THÈSE

présentée

A L'UNIVERSITÉ DE PARIS VI

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

par

HOANG DUC PHUONG

Sujet de la Thèse :

LA MESURE DE LA VITESSE DES ONDES ULTRASONORES SECONDAIRES.

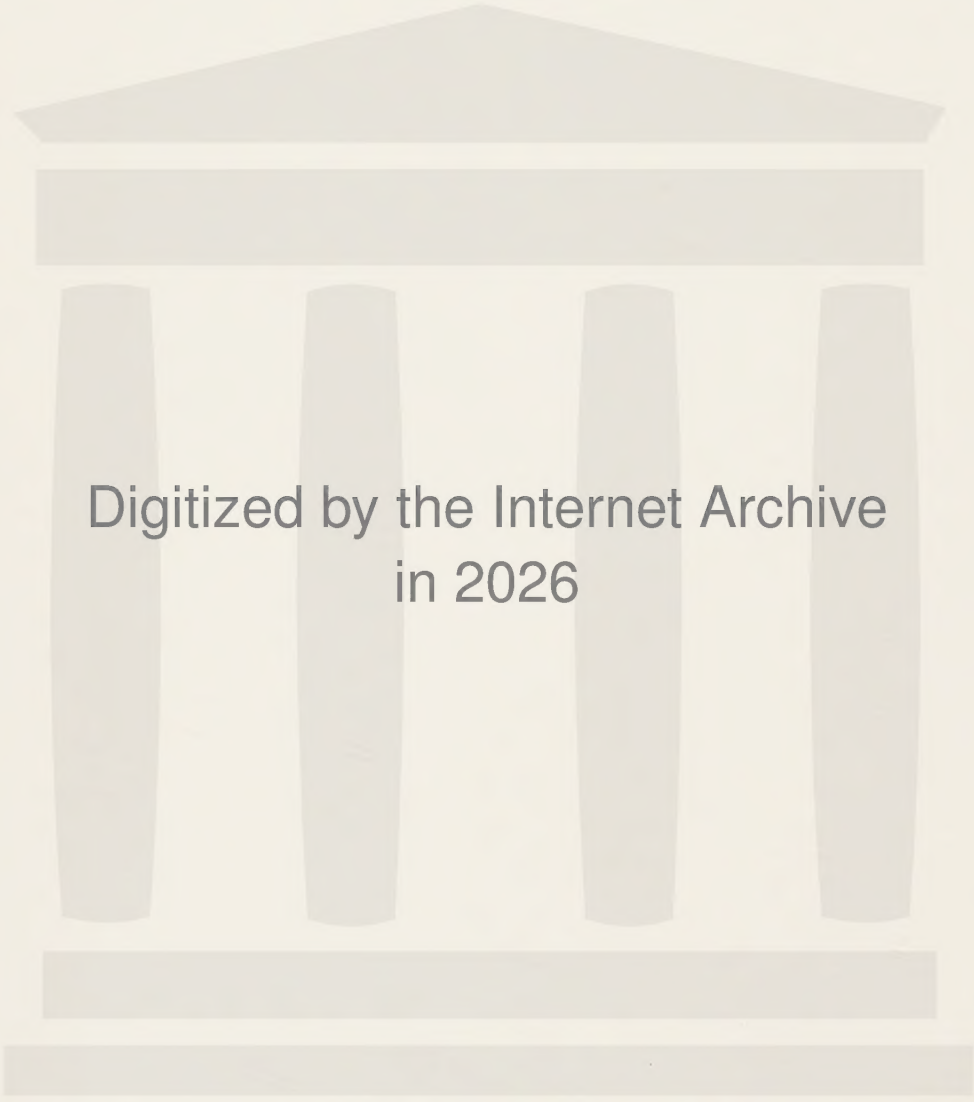
APPLICATION DANS LE CALCUL DES FACTEURS INDISPENSABLES A LA STRUCTURE D'UN OUVRAGE D'ART.

Soutenue le 24 Mars 1973 devant la Commission d'Examen

Président : JOFFRIN Jacques

Examinateurs : ASTIER André
ZAREMBOVITCH André

DACTYLO-SORBONNE
8, rue Casimir Delavigne
PARIS 6e
1973


Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549224_0013

THÈSE

présentée

A L'UNIVERSITÉ DE PARIS VI

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

par

HOANG DUC PHUONG

Sujet de la Thèse :

LA MESURE DE LA VITESSE DES ONDES ULTRASONORES SECONDAIRES.

APPLICATION DANS LE CALCUL DES FACTEURS INDISPENSABLES A LA STRUCTURE D'UN OUVRAGE D'ART.

Soutenue le 24 Mars 1973 devant la Commission d'Examen

Président : JOFFRIN Jacques

Examinateurs : ASTIER André
ZAREMBOVITCH André

DACTYLO-SORBONNE
8, rue Casimir Delavigne
PARIS 6e
1973

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Je suis profondément reconnaissant à Monsieur le Professeur Jacques JOFFRIN du soin avec lequel il m'a conseillé et guidé tout au long de ce travail et d'avoir bien voulu accepter de présider le Jury de ma thèse.

Je remercie profondément Messieurs les Professeurs André ASTIER, André ZAREMBOVITCH qui ont bien voulu accepter de faire partie du Jury.

Je tiens également à remercier tous ceux qui ont travaillé avec moi à l'élaboration de cette thèse.

P L A N

Introduction p. 1

CHAPITRE I - Théorie des Ondes p. 6

A - Structure des corps solides et modes de vibration des particules p. 6

B - Types d'Ondes p. 6

C - Propagation d'énergie p. 8

D - Réflexion sur un obstacle p. 10

E - Théorie de l'élasticité p. 10

CHAPITRE II - Mesure de la vitesse des ondes secondaires - Résultats obtenus au chantier p. 17

CHAPITRE III - Méthode de manipulation p. 39

A - Appareillages utilisés p. 39

B - Rôle des appareils p. 39

C - Chaîne de montage p. 41

D - Méthode de pointage p. 43

E - Mesure de la masse spécifique ρ p. 45

F - Calcul des facteurs σ et E p. 46

G - Estimation de la valeur de R_c p. 47

Conclusion p. 51

Bibliographie p. 53

Annexe p. 55

INTRODUCTION

-:-

Avant la mise en service d'un Ouvrage d'Art, il faut connaître ses caractéristiques techniques pour limiter la charge maximum qu'il peut supporter sans risque d'être détérioré ou détruit par la surcharge.

Les facteurs principaux de la structure d'un Ouvrage d'Art sont :

- La résistance de la rupture à la compression (R_c)
- Le module d'élasticité de YOUNG (E)

°°°

Jusqu'à ce jour on ne dispose que de deux types de mesure :

- destructive
- non destructive

Dans une mesure destructive, on extrait des échantillons qu'on soumet à des essais d'écrasement à la presse pour mesurer directement les valeurs de R_c et de E. Cette méthode donne des valeurs assez précises sur l'ensemble du chantier, mais elle modifie les caractéristiques initiales de l'Ouvrage.

Dans une mesure non destructive, on utilise des phénomènes tels que :

- la vitesse de propagation des ondes sonores
- le champ magnétique créé par un courant électrique
- l'absorption de rayons γ , etc ...

pour estimer les caractéristiques précédentes. A l'heure actuelle, les valeurs données par ces méthodes ne sont pas précises, elles ont une dispersion assez grande ; mais en revanche les caractéristiques d'un

Ouvrage d'Art ne sont pas modifiées par ces mesures. Elles permettent aussi de contrôler tous les points, d'où une constatation à 100 %.

°°°

Dans cette étude nous avons utilisé une méthode de mesure non destructive par ondes sonores (acoustique) que l'on appelle souvent "Auscultation Dynamique" du béton.

Jusqu'à présent, seule la vitesse de propagation des ondes longitudinales, c'est-à-dire la vitesse de propagation des ondes les plus rapides, était mesurée par l'Auscultation Dynamique. Il s'agissait de déterminer le temps "t" de propagation d'une onde sur un parcours déterminé afin d'en déduire la vitesse de propagation par la formule: V^m/s = distance/"t".

A l'heure actuelle, les nouveaux Ouvrages d'Art sont contrôlés par un prélèvement d'échantillons lors du coulage du béton ; quant aux anciens Ouvrages d'Art on ne possède aucune méthode de contrôle non destructive efficace.

La mesure de la vitesse des Ondes Secondaires résoud facilement ce problème. En effet, en connaissant le rapport des deux vitesses, longitudinale et transversale, nous pouvons :

- calculer le COEFFICIENT de POISSON (σ)
- calculer le MODULE D'ELASTICITE de YOUNG (E)
- estimer la résistance de rupture à la compression (R_c)

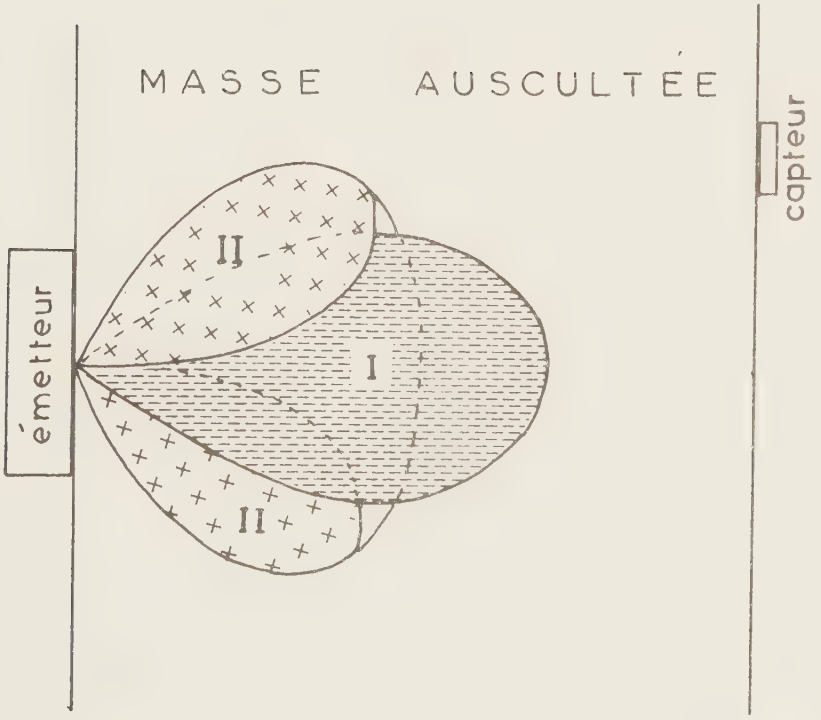
facteurs indispensables à la structure d'un Ouvrage d'Art.

°°°

Notre travail est de décrire une méthode de mesure de la vitesse des Ondes Transversales (ou Ondes Secondaires) propagées par des impulsions ultrasonores dans une masse de béton.

Dans la mesure des intensités des faisceaux d'ondes, nous constatons qu'il existe des zones qui ne sont favorables qu'aux ondes longitudinales (transversales): dans ces zones les énergies transmises par les ondes longitudinales (transversales) sont plus puissantes que celles transmises par les ondes transversales (longitudinales).

F i g. 1



(I) : Faisceau d'énergie émise par les ondes longitudinales
(II): " " " " transversales

Donc, si nous mettons le capteur dans la zone II (cf.fig.1) nous ne percevons que l'arrivée des ondes secondaires ; mais si nous mettons le capteur dans l'inter-zone nous mesurons en même temps les arrivées des ondes longitudinales et des ondes transversales.

Au contraire, si nous mettons le capteur sur l'axe de l'émetteur nous ne mesurons que l'arrivée des ondes longitudinales.

Une fois que les vitesses des ondes longitudinales et des ondes transversales sont mesurées, les facteurs E et σ seront calculés suivant les formules théoriques ci-dessous :

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1 - \sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}}$$

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{2(1 + \sigma)}}$$

La masse volumique " ρ " est mesurée par le gammadensimètre; appareil basé sur l'absorption des rayons " γ " par la masse auscultée.

Nous avons deux équations à deux inconnus (E et σ), donc le problème est résolu.

Quant à la résistance de rupture R_c, elle est estimée par la relation approximative suivante, que nous avons établie lors de nos essais au laboratoire.

$$0,85.10^{-3} \leq R_{c/E} \leq 1,1.10^{-3}$$

V_L : Vitesse de propagation des ondes longitudinales

V_T : " " " transversales.

Dans cet intervalle nous avons une probabilité de 0,57. Avec une erreur relative de 15 % il nous permet de prendre la formule :

$$R_c = 10^{-3}E$$

Dans la pratique, la contrainte admissible prise en compte dans le calcul des Ouvrages d'Art est la limite inférieure estimée de R_c. D'après nos essais sur les éprouvettes de béton de plusieurs catégories, nous trouvons que :

Contrainte	Probabilité pour que l'Ouvrage puisse supporter la contrainte sans être détérioré
$R_c \leq 0,4.10^{-3}E$	1,00
$R_c = 0,6.10^{-3}E$	0,90
$R_c = 0,8.10^{-3}E$	0,75
$R_c = 10^{-3}E$	0,23
$R_c = 1,3.10^{-3}E$	0,000000

Donc, la contrainte maximale prise en compte dans ce calcul sera :

$$R_c = 0,4.10^{-3}E$$

CHAPITRE I

-:-

THEORIE DES ONDES SONORES

-:-

A - Structure des corps solides et modes de vibration des particules

Dans un corps solide, il existe des molécules qui sont réparties en un réseau régulier. Si on applique une force extérieure, dite force excitatrice, en un point d'un corps solide, dit source, les molécules se meuvent en chaîne à partir de la source avec un amortissement d'énergie transmise. Leurs mouvements dépendent du rythme de la source excitatrice. Le mouvement des particules est donc très compliqué, mais on peut toujours le décomposer en trois vecteurs suivant les axes de base cartésienne ($\vec{ox}$, $\vec{oy}$, $\vec{oz}$).

Si le vecteur de déplacement $\vec{D}$ est parallèle à la direction de la propagation, ce mouvement est dit "OSCILLATION LONGITUDINALE". S'il est perpendiculaire à la direction de propagation, il est dit "OSCILLATION TRANSVERSALE".

B - Types d'ondes

Une onde transmise à travers un milieu peut-être de plusieurs types. Chaque type correspond à un mouvement particulier des particules. La trajectoire décrite par ce mouvement sous l'effet des ondes est appelée orbite. Les orbites peuvent être essentiellement parallèles à la direction de la propagation, dans ce cas l'onde est dite "ONDE LONGITUDINALE". Elles peuvent être normales à la direction de propagation, une telle onde est alors dite "ONDE TRANSVERSALE".

D'autre part, une onde se distingue aussi par le fait qu'elle modifie ou non le volume du matériau dans lequel elle se propage. Si elle modifie le volume du matériau, elle est appelée "ONDE DE DILATATION" ; au contraire si elle ne le modifie pas, elle est appelée "ONDE DE DISTORSION".

Une onde longitudinale est une onde de dilatation, sa vitesse de propagation est la plus élevée, et le vecteur de déplacement $\vec{D}$ d'une particule sous l'effet de cette onde est parallèle à la direction de la propagation.

Une onde transversale est une onde de distorsion, sa vitesse de propagation est plus faible que celle d'une onde longitudinale. Le vecteur de déplacement d'une particule sous l'effet de cette onde se trouve dans le plan d'onde, c'est-à-dire qu'il est perpendiculaire à la direction de la propagation.

°.°

Les ondes de chacun de ces types peuvent être continues, modulées ou composées d'impulsions. Les ondes peuvent être détectées par des moyens variés.

Les ondes transversales ne se propagent que dans un milieu solide ou liquide imparfait, c'est-à-dire visqueux ; car dans ces milieux il existe des forces de cisaillement. Dans un liquide parfait, ou gazeux, les forces de cisaillement sont nulles, il n'existe que des ondes longitudinales.

C - Propagation d'énergie

Avec une plaque ordinaire de Quartz, l'énergie est localisée dans un cône dont le demi angle d'ouverture est donné par la formule :

$$\text{Sin } A = 1{,}2 \frac{\lambda}{D} \qquad (1)$$

λ : Longueur d'onde

D : Diamètre de la surface de contact (cf.figures 1 & 2)

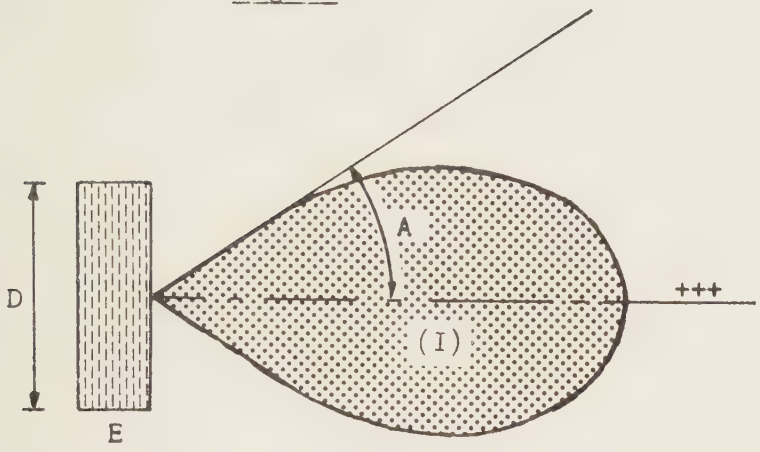
Le bord du cristal créé des sources de perturbation (on les appelle souvent sources secondaires. Pour ne pas les confondre avec les ondes dites secondaires, ou faisceaux des ondes secondaires, nous utilisons le mot perturbation). Celles-ci donnent naissance à des faisceaux d'énergie de perturbation (cf. figure 3, page 9).

Au point de vue de l'énergie transmise suivant l'axe de l'émetteur, les faisceaux principaux ont des énergies plus fortes que celles des faisceaux de perturbation.

D'autre part, les directions principales des faisceaux de perturbation ne sont pas fixes et forment un angle d'attaque souvent très grand avec la normale à la surface du matériau dans lequel ces ondes de perturbation doivent se propager. Vu la grandeur de cet angle d'attaque, l'énergie transmise dans le matériau par ces ondes est diminuée énormément. Tandis que les faisceaux principaux ont des directions fixes, proches de la normale à la surface du matériau. C'est pourquoi les énergies de ces ondes sont transmises presque complètement dans le matériau.

Pour pouvoir être enregistrée par les appareils de mesure, l'énergie captée doit dépasser un certain seuil. Dans la mesure, seuls les faisceaux d'énergie principaux sont considérés, car leur énergie

Fig. 1

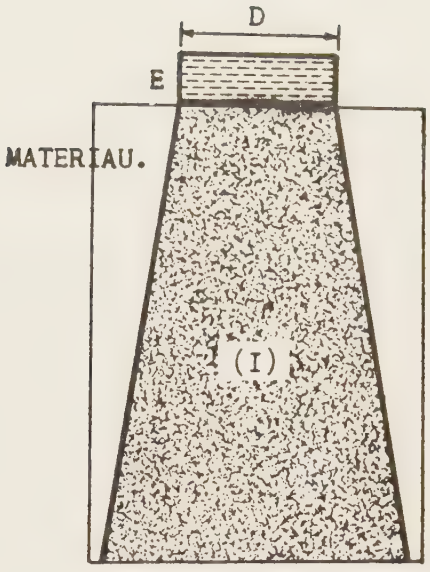


A : Angle d'ouverture du faisceau d'énergie

E : Cristal d'émission (émetteur)

(I) : Faisceau d'énergie principal

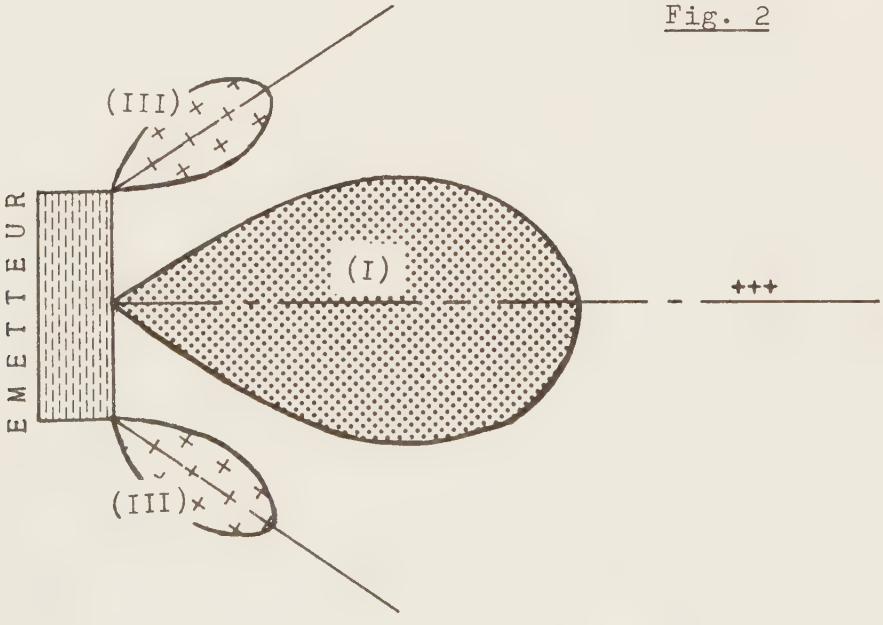
+++ : Direction de la propagation



E : Cristal d'émission

(I) : Faisceau d'énergie émise par le cristal à travers un matériau.

Fig. 2



(I) : Faisceau d'énergie principal

(III): " " de perturbation dû par effet de bord

+++ : Direction de la propagation

Fig. 3

dépasse largement le seuil de l'appareillage. Les énergies des faisceaux de perturbation seront éliminées en grande partie par ce seuil, le reste est négligeable devant l'intensité des faisceaux principaux et interfère avec ceux-ci.

D - Réflexion sur un obstacle

Si l'obstacle est large par comparaison avec la longueur d'onde, on constate qu'il se produit une forte onde réfléchie qui revient à partir de l'obstacle. Une ombre bien définie est projetée derrière l'obstacle (cavité dans une masse de béton par exemple) et il peut exister une certaine diffraction de l'onde autour des bords de l'obstacle.

Si par contre, l'obstacle est de petite dimension et ne représente qu'une petite fraction de la longueur d'onde, il n'y a ni réflexion réelle, ni ombre. L'énergie ultrasonore semble contourner l'obstacle et s'accumuler derrière lui sans interférence [11] .

E - Théorie de l'élasticité

a/- Quelques définitions :

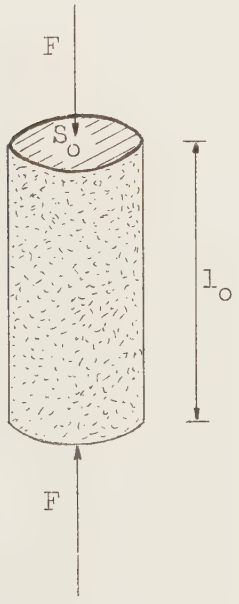


Fig. 4

Soit une éprouvette cylindrique de section S_o et de longueur l_o , si nous appliquons une force F sur la section S_o l'éprouvette sera déformée et on a les variations Δl et ΔS. Quand on enlève la charge F, si l'éprouvette revient à ses dimen-

sions initiales, c'est-à-dire si elle ne présente aucune déformation résiduelle, on dit que l'éprouvette travaille dans le domaine élastique. Dans ce domaine la déformation suit la loi de HOOKE :

$$\frac{F}{S_o} = E \quad \frac{\Delta l}{l_o} \qquad (2)$$

E s'appelle le MODULE d'ELASTICITE ou MODULE DE YOUNG. Cette valeur ne varie pas avec les élancements (valeur du rapport $l_o/\varnothing_o$)

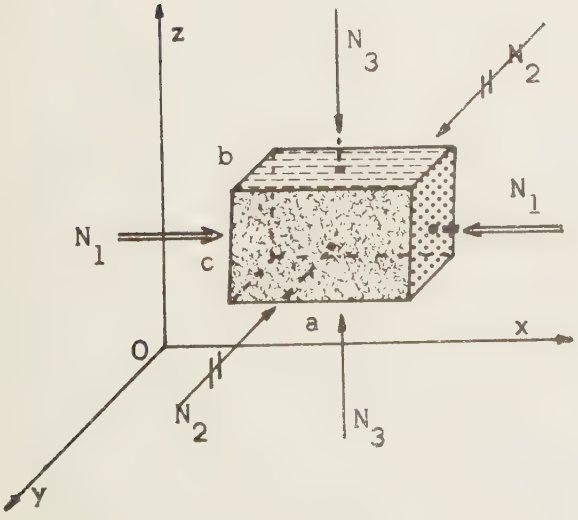
Si $\varnothing_o$ est le diamètre de la section S_o ($S_o = \frac{\pi}{4} \varnothing_o^2$) nous avons :

$$\frac{\Delta \varnothing}{\varnothing_o} = - \sigma \frac{\Delta l}{l_o} \qquad (3)$$

σ s'appelle le COEFFICIENT de POISSON. A cause de la déformation en sens inverse entre Δl et $\Delta \varnothing$ la valeur σ est toujours positive. D'après les études on trouve que la valeur σ ne varie pas avec l'âge du béton [3].

°°°

F i g. 5



Faisons un essai triaxial en compression sur un parallélépipède de côtés a, b, c et de volume : V = a.b.c

Sous l'effet des efforts opposés deux par deux le parallélépipède est en équilibre, mais il subit une déformation dans le domaine élastique.

Cette déformation est dite "DILATATION CUBIQUE".

$$\theta = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta c}{c}$$

où le rapport $\frac{\Delta a}{a}$ est la valeur dont diminue le côté a ; elle dépend des trois efforts N_1 , N_2 , N_3. D'après les relations (2) et (3) nous aurons :

- action de N_1 seule : $\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta l}{l_o} = \frac{N_1}{b.c} \cdot \frac{1}{E}$

- " N_2 " : $\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta \phi}{\phi_o} = -\sigma \frac{N_2}{c.a} \cdot \frac{1}{E}$

- " N_3 " : $\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta \phi}{\phi_o} = -\sigma \frac{N_3}{a.b} \cdot \frac{1}{E}$

d'où d'après le principe de superposition :

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{1}{E} \left(\frac{N_1}{bc} - \sigma \frac{N_2}{ca} - \sigma \frac{N_3}{ab} \right) \qquad (4)$$

Par permutation circulaire nous obtenons les autres valeurs :

$$\frac{\Delta b}{b} = \frac{1}{E} \left(\frac{N_2}{ca} - \sigma \frac{N_3}{ab} - \sigma \frac{N_1}{bc} \right)$$

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{1}{E} \left(\frac{N_3}{ab} - \sigma \frac{N_1}{bc} - \sigma \frac{N_2}{ca} \right)$$

Finalement :

$$\theta = \frac{1 - 2\sigma}{E} \left(\frac{N_1}{bc} + \frac{N_2}{ca} + \frac{N_3}{ab} \right) \qquad (5)$$

En ajoutant la quantité nulle $\sigma \frac{N_1}{bc} - \sigma \frac{N_1}{bc}$ dans la relation (4) nous aurons :

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{1}{E} \left[(1 + \sigma) \frac{N_1}{bc} - \sigma \frac{\theta E}{1-2\sigma} \right]$$

$$= \frac{1+\sigma}{E} \cdot \frac{N_1}{bc} - \frac{\sigma \theta}{1-2\sigma}$$

A partir de cette relation, nous tirons finalement :

$$\frac{N_1}{bc} = \frac{E}{1+\sigma}\left(\frac{\sigma}{1-2\sigma}\Theta + \frac{\Delta a}{a}\right)$$

et des relations analogues pour $\frac{N_2}{ca}$, $\frac{N_3}{ab}$ après la permutation circulaire.

Nous sommes alors menés à poser :

$$\lambda = \frac{\sigma E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} \qquad (6)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\sigma)} \qquad (7)$$

λ et μ sont les deux coefficients désignés en théorie de l'élasticité sous le nom de : COEFFICIENT DE LAME.

b/- Equation de la vibration d'une particule dans le domaine élastique sous l'effet des ondes sonores

Dans un milieu élastique, sous l'effet d'une source excitatrice chaque particule se meut suivant une direction qui est une fonction du temps. D'après la théorie de l'élasticité, ([12] ; [13] ; [14]) l'équation vectorielle de ce mouvement est :

$$\left[(\mu + \lambda) \text{ grad.div.} + \mu\Delta - \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] \vec{D} = 0 \qquad (8)$$

$\vec{D}$; Vecteur de déplacement d'un point du milieu. t : Le temps

Δ : Opérateur Laplacien. ρ : La masse volumique (ou spécifique)

λ et μ : Coefficients de Lamé.

Ondes Longitudinales

Comme nous avons dit que l'onde longitudinale est une onde de dilatation, le vecteur de déplacement $\vec{D}$ est perpendiculaire au plan d'onde. Donc

$$\vec{D} = \overrightarrow{\text{grad } \Phi} \qquad (9)$$

et

$$\Phi = K\ e^{(2i\pi/\lambda)(ux + vy + wz - V_L t)} \qquad (10)$$

pour une onde sinusoïdale plane de vitesse V_L.

Alors, l'équation (8) deviendra, en notant que div.grad. = Δ et grad. Δ = Δ .grad.

$$\left[(\lambda + 2\mu)\ \Delta - \rho\ \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] \times \overrightarrow{\text{grad. } \Phi} = 0 \qquad (11)$$

finalement on doit avoir la relation

$$(\lambda + 2\mu)(u^2 + v^2 + w^2) = \rho\ V_L^2$$

mais $u^2 + v^2 + w^2 \equiv 1$, donc :

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

En remplaçant λ et μ par leurs valeurs (6) et (7) on aura :

V_L : Vitesse de propagation des ondes longitudinales

λ : Longueur d'onde

Φ : Potentiel scalaire, fonction de trois variables d'espace x,y,z

u,v,w : Cosinus directeurs de la normale au plan d'onde
$(u^2 + v^2 + w^2 \equiv 1)$

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \sqrt{\frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$$

Ondes transversales

Pour une onde transversale, l'extension de volume est nulle. Donc, nous devons avoir :

$$\vec{D} = \overrightarrow{\text{rot } \vec{A}}$$

Avec div.rot $\equiv 0$, l'équation (8) s'écrira donc :

$$\left[\mu\Delta - \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] \overrightarrow{\text{rot } \vec{A}} = 0 \qquad (13)$$

Dans le cas où le potentiel vecteur $\vec{A}$ est une onde sinusoïdale plane nous avons :

$$\vec{A} = (A_x, A_y, A_z)\, e^{(2i\pi/\lambda)(ux + vy + xz - V_T t)}$$

Donc

$$\vec{D} = \overrightarrow{\text{rot } \vec{A}}$$

$$= (X, Y, Z)\, e^{(2i\pi/\lambda)(ux + vy + wz - V_T t)} \qquad (14)$$

D'autre part la relation div. $\vec{D} \equiv 0$ entraîne $uX + vY + wZ \equiv 0$ démontre que $\vec{D}$ se trouve dans le plan d'onde ; car le produit scalaire de (X, Y, Z) et (u, v, w) est nul. C'est la caractéristique d'une onde transversale.

Finalement l'équation (13) s'écrira :

$$\mu (u^2 + v^2 + w^2) = \rho V_T^2$$

λ : Longueur d'onde

V_T : Vitesse de propagation d'une onde transversale.

donc :

$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \qquad (15)$$

En remplaçant μ par sa valeur de l'équation (7) on aura la formule :

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \sqrt{\frac{1}{2(1+\sigma)}} \qquad (16)$$

-:-

CHAPITRE II

-:-

METHODE DE MESURE DE LA VITESSE DES ONDES SECONDAIRES

RESULTATS OBTENUS AU CHANTIER

-:-

Dans ce chapitre nous exposerons une méthode originale de mesure du rapport V_T/V_L (vitesse de propagation d'une onde transversale sur vitesse de propagation d'une onde longitudinale) que nous appellerons:

"METHODE D'OUVERTURE d'ENERGIE".

°°°

Rappelons que la relation Sin A = 1,2 λ/D (1) démontre que le faisceau d'énergie d'une onde longitudinale est limité par l'angle A. D'autre part les faisceaux d'énergie d'ondes longitudinale et transversale sont décalés l'un par rapport à l'autre. Il existe donc une zone favorable aux ondes longitudinales, et une zone favorable aux ondes transversales. Dans celle-ci apparaissent également des ondes longitudinales, mais à faible énergie seulement. Inversement le même phénomène existe dans la zone favorable aux ondes longitudinales.

Si nous mettons le capteur dans l'inter-zone (cf.fig.6), sur l'écran de l'oscilloscope cathodique nous verrons l'apparition des ondes primaires et secondaires (ou longitudinales et transversales). Le rapport des deux vitesses sera égal au rapport inverse des deux temps de propagation (cf.résultats des mesures sur le chantier A.15,page 21 et la suite).

Nous avons appliqué cette méthode pour le contrôle des pieux d'un pont du chantier A.15 - P.I.6 qui se trouve à Argenteuil; au croisement de l'Autoroute A.15 et l'Autoroute A.87 (P.I.6 : passage inférieur au point de repère n°6).

Dans ce contrôle, nous avons implanté deux tubes parallèles dans chaque pieu ausculté. La distance inter-centres de ces deux tubes est de 0,65 mètre. Pour assurer la bonne transmission nous mettons de l'eau dans ces deux tubes, puis nous y plongeons émetteur et capteur (Fig.7).

L'émetteur se trouve au niveau de 10 mètres au-dessous de la tête du pieu. Le capteur se déplace jusqu'au moment où on trouve l'apparition des ondes secondaires. A ce moment on trouvera le rapport des deux vitesses V_T/V_L . Les résultats de ces mesures sont rassemblés aux tableaux I et II (pages 21 & 22).

°°°

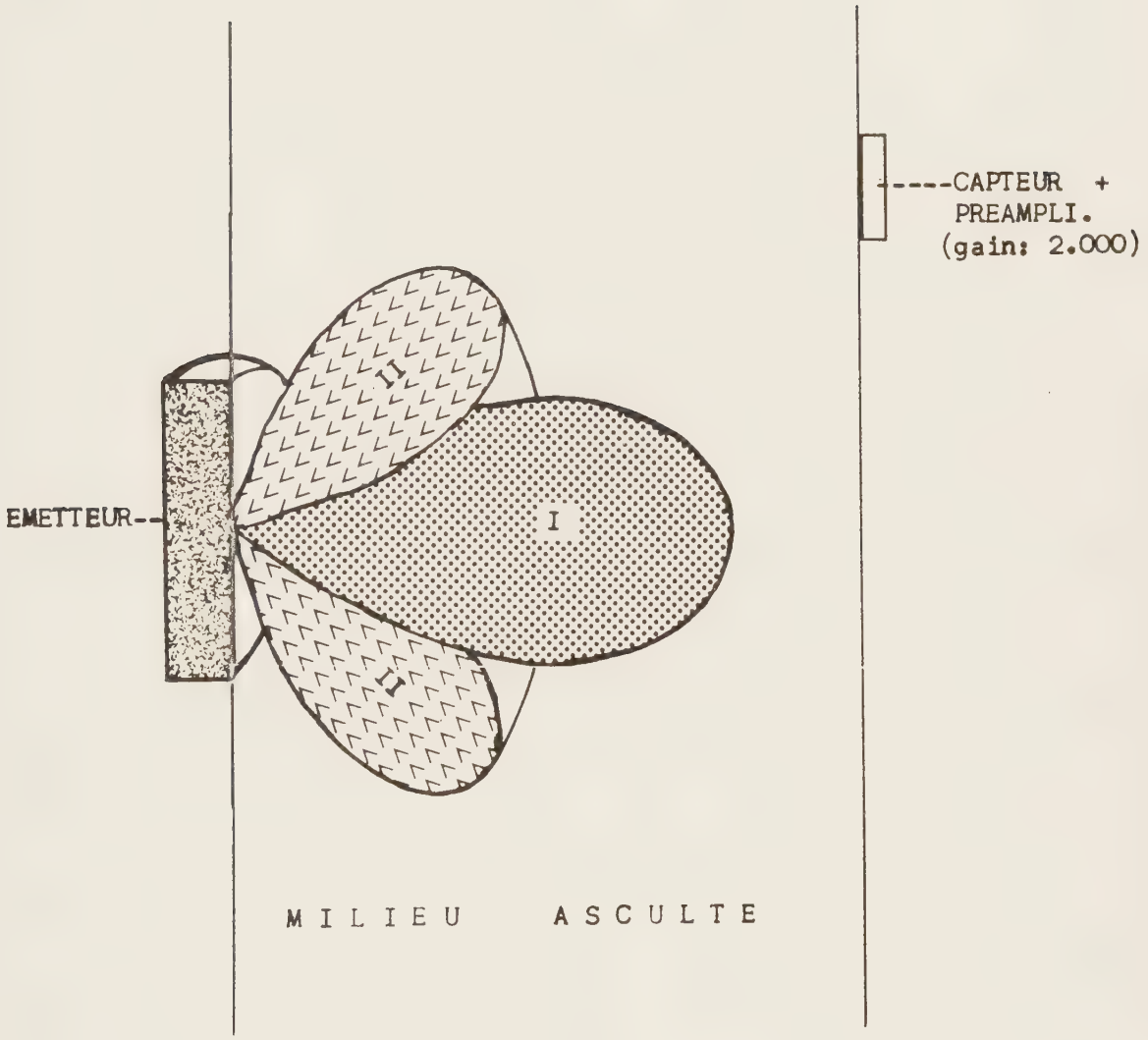
Pour confirmer la validité de cette méthode de mesure nous comparons les valeurs de E calculées à partir des valeurs $K = V_T/V_L$ mesurées au chantier et celles mesurées sur les éprouvettes de béton de même nature par la presse suivant la loi de HOOKE ($F/S = E. \Delta l/l_o$).

Remarques :

- Les pieux étaient testés au moment où ils ne supportaient aucune charge. Donc, les valeurs de E calculées sont des valeurs à l'origine de la courbe de déformation.

- La masse volumique " ρ " est mesurée sur les éprouvettes de béton de même nature que le pieu ausculté.

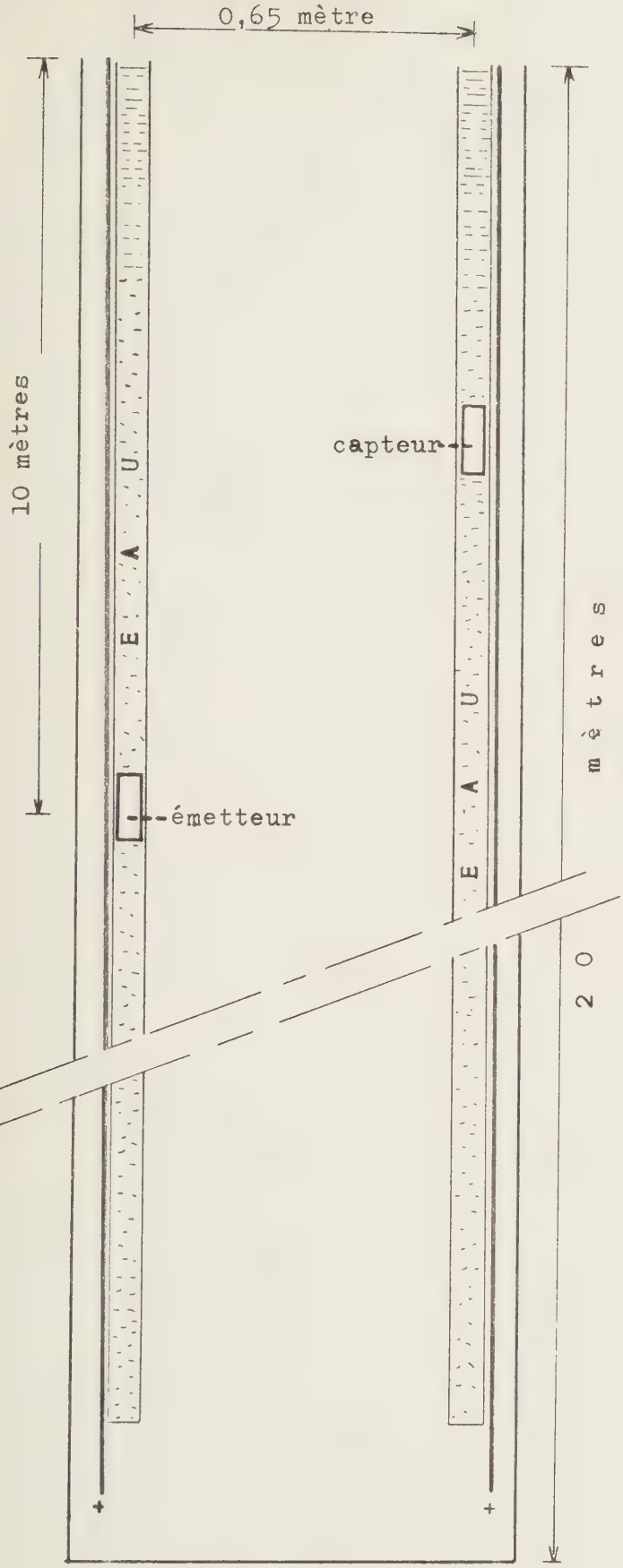
Fig. 6



Faisceaux d'énergie des ondes émises par un émetteur à Quartz en forme de disque

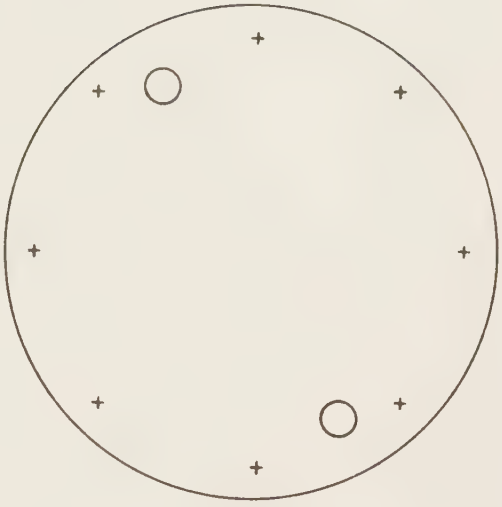
(I) : Faisceau d'énergie des ondes longitudinales

(II) : " " " transversales.



Pieu de béton
(VUE EN COUPE)

VUE DE DESSUS



+ : Armatures (8 fils à Ø = 20 mm)

○ : Tuyaux pour l'Auscultation Dynamique
(Ø = 55/60 mm)

N.B. : L'émetteur et le capteur descendent par leur propre poids tenu par les fils conducteurs.

F i g. 7

P I E U 5 0 1 (ρ = 2,25 tonnes/m3)

Décalage émetteur-capteur (+)	(++)	Distance parcourue (m)	Temps de propagation (μ s) ondes longitudinales (+)	(++)	ondes transversales (+)	(++)	$K = V_T / V_L$	Vitesse de propagation (m/s) Longit.	Transver.	σ	E(bars)
-0,30m	-0,25m	0,696m	152,3	162,3				4 290,93			
-0,20	-0,15	0,667	146,5	156,5				4 262,51			
-0,10	-0,05	0,6519	140,8	150,8				4 323,07			
-0,05	0,0000	0,650									
0,00	+0,05	0,6519	140,8	150,8				4 323,07			
0,10	0,15	0,667	146,5	156,5				4 262,51			
0,20	0,25	0,694	149,4	159,4				4 369,00			
0,30	0,35	0,738	158,0	168,0				4 394,29			
0,40	0,45	0,790	172,4	182,4				4 334,25			
0,50	0,55	0,851	186,7	196,7				4 328,76			
0,60	0,65	0,919	201,1	211,1				4 354,51			
0,70	0,75	0,992	218,4	228,4				4 345,31			
0,80	0,85	1,070	235,6	245,6				4 356,86			
0,90	0,95	1,151	255,7	265,7				4 332,27			
1,00	1,05	1,2349	275,8	285,8				4 320,85			
1,30	1,35	1,498	344,82	354,82				4 222,79			
1,60	1,65	1,773	413,78	423,78				4 184,75			
1,90	1,95	2,055	482,74	492,74				4 171,53			
2,40	2,45	2,534	586,19	596,19				4 251,59			
2,90	2,95	3,020	712,62	722,62	1 149,40	1 159,40	0,62327	4 180,28	2 605,45	0,1823	361 013
3,40	3,45	3,510	827,56	837,56	1 333,30	1 343,30	0,62350	4 191,57	2 613,48	0,1820	363 292
3,90	3,95	4,003	1 005,74	1 015,74	1 655,16	1 665,16	0,60999	3 941,09	2 404,04	0,2037	313 049
4,40	4,45	4,497	1 120,68	1 130,68	1 810,33	1 820,33	0,62114	3 977,44	2 470,55	0,1859	325 725
4,90	4,95	4,992	1 235,62	1 245,62	1 982,74	1 992,74	0,62508	4 008,03	2 505,34	0,1793	333 105

(+) : Valeur mesurée sur les photos

(++) : Valeur corrigée d'après les courbes (0,0000 correspond au temps de propagation minimum .

Suivant les graphiques de la page 23, le retard de réponse est de 10 μ s, donc :
temps réel de propagation = temps mesuré + 10 μ s)

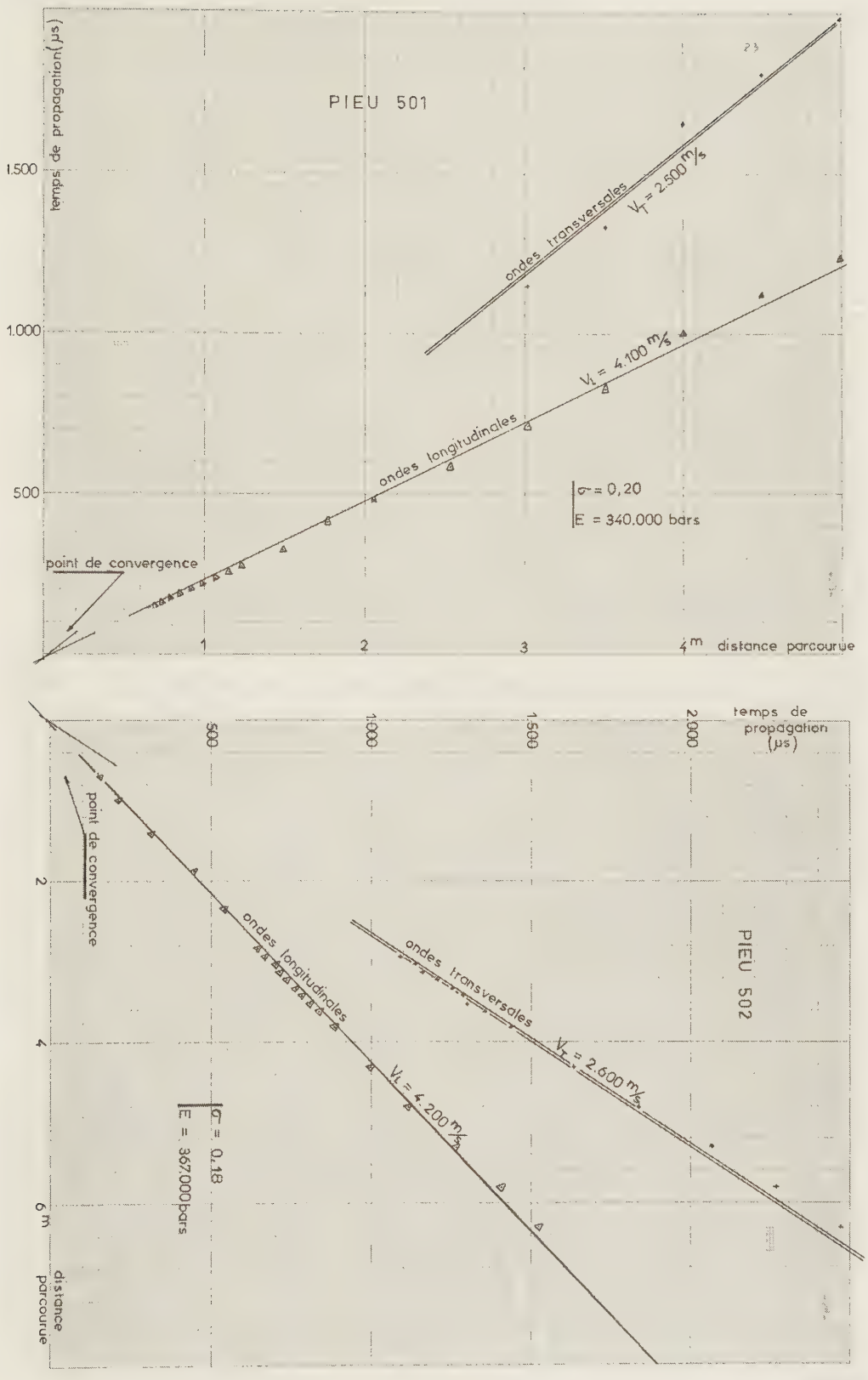
P I E U 5 0 2 (ρ = 2,27 tonnes/m3)

Décalage émetteur-capteur (+)	(++)	Distance parcourue (mètre)	Temps de propagation (µ s). Ondes longitudinales (+)	(++)	Ondes transversales (+)	(++)	K= V_T/V_L	Vitesse de propagation(m/s) Longit.	Transv.	σ	E(bars)
0,45m	-0,48m	0,8080	181,03	191,03				4 229,81			
0,30	-0,33	0,7289	163,78	173,78				4 194,79			
0,15	-0,18	0,6744	152,29	162,29				4 155,90			
0,00	-0,03	0,65069	146,54	156,54				4 156,70			
0,03	0,0000	0,6500									
0,15	+0,12	0,6609	149,42	159,42				4 146,17			
0,30	0,27	0,7038	155,16	165,16				4 261,60			
0,80	0,77	1,0076	221,25	231,25				4 357,49			
1,30	1,27	1,4266	313,21	323,21				4 414,07			
1,80	1,77	1,8855	448,26	458,26				4 114,64			
2,30	2,27	2,3612	540,21	550,21				4 291,50			
2,80	2,77	2,8452	643,66	653,66				4 325,78			
2,90	2,87	2,942	666,65	676,65	1 091,93	1 101,93	0,61405	4 348,90	2 670,48	0,19735	387 655
3,00	2,97	3,04029	701,13	711,13	1 137,90	1 147,90	0,61950	4 275,30	2 648,57	0,18860	378 536
3,10	3,07	3,1380	712,62	722,62	1 160,89	1 170,89	0,61715	4 342,60	2 680,06	0,19240	388 832
3,20	3,17	3,2359	735,61	745,61	1 206,87	1 216,87	0,61272	4 340,00	2 659,24	0,19945	385 073
3,30	3,27	3,3339	764,35	774,35	1 252,84	1 262,84	0,61318	4 305,51	2 640,06	0,19873	379 317
3,40	3,37	3,4321	781,59	791,59	1 287,32	1 297,32	0,61017	4 335,72	2 645,54	0,20343	382 385
3,50	3,47	3,5303	809,17	819,17	1 298,82	1 308,82	0,62588	4 309,67	2 697,35	0,17800	389 109
3,60	3,57	3,62869	839,06	849,06	1 356,29	1 366,29	0,62143	4 273,77	2 655,87	0,18543	379 612
3,80	3,77	3,8256	885,03	895,03	1 436,75	1 446,75	0,61864	4 274,29	2 644,28	0,19000	377 752
4,30	4,27	4,3191	999,97	1 009,97	1 632,14	1 642,14	0,61503	4 276,55	2 630,21	0,19580	375 573
4,80	4,77	4,8140	1 114,91	1 124,91	1 839,04	1 849,04	0,60837	4 279,52	2 603,55	0,20620	371 195
5,30	5,27	5,3099	1 264,36	1 274,36	2 068,95	2 078,95	0,61298	4 166,74	2 554,14	0,19904	355 121
5,30	5,77	5,80649	1 408,03	1 418,03	2 270,10	2 280,10	0,62191	4 094,76	2 546,59	0,18464	348 782
6,30	6,27	6,3036	1 522,98	1 532,98	2 471,25	2 481,25	0,61782	4 111,99	2 540,49	0,19132	349 072

(+) : Valeur mesurée sur les photos.

(++) : Valeur corrigée d'après les courbes. (0.0000 correspond au temps de propagation minimum.

Suivant les graphiques de la page 23, le retard de réponse est de 10 µ s, donc il faut ajouter 10 µ s dans le temps mesuré pour avoir le temps réel de propagation).


PIEU 501
temps de propagation (µs)
1.500
1.000
500
ondes transversales
V_T = 2.500 m/s
V_L = 4.100 m/s
ondes longitudinales
σ = 0,20
E = 340.000 bars
point de convergence
1
2
3
4 m distance parcourue
PIEU 502
temps de propagation (µs)
500
1.000
1.500
2.000
point de convergence
ondes longitudinales
ondes transversales
V_T = 2.600 m/s
V_L = 4.200 m/s
σ = 0,18
E = 367.000 bars
2
4
6 m
distance parcourue

Dans une loi normale de PROBABILITE :

50 % des observations se trouvent dans l'intervalle $\bar{X} \pm 0{,}67.s$

68 % " " " $\bar{X} \pm 1{,}00.s$

95 % " " " $\bar{X} \pm 1{,}96.s$

99 % " " " $\bar{X} \pm 2{,}58.s$

99,8 % " " " $\bar{X} \pm 3{,}09.s$

99,98 % " " " $\bar{X} \pm 3{,}72.s$

$\bar{X}$ est la moyenne arithmétique des valeurs mesurées :

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}$$

s est l'écart-type : $s = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \bar{X})^2}}{\sqrt{n}}$

Pour avoir une probabilité de 0,95 nous considérons habituellement l'intervalle $\bar{X} \pm 2s$.

D'après les résultats précédents nous avons :

	Pieu 501 (E bars)	Pieu 502 (E bars)
Moyenne arithmétique ($\bar{E}$ en bars)	339 236	374 858
Ecart-type : (s)	19 793	13 458
$\bar{E} + 2s$	378 822	401 774
$\bar{E} - 2s$	299 650	347 942

Sur les graphiques de la page 23, les points représentatifs du temps de propagation en fonction de la distance parcourue, les points s'alignent suivant la droite "ONDES LONGITUDINALES". Cela démontre que les bétons des pieux 501 et 502 sont homogènes et isotropes. Leurs modules d'élasticité sont :

PIEU 501 : 299 650 bars $\leqslant E \leqslant$ 378 822 bars

PIEU 502 : 347 942 bars $\leqslant E \leqslant$ 401 774 bars

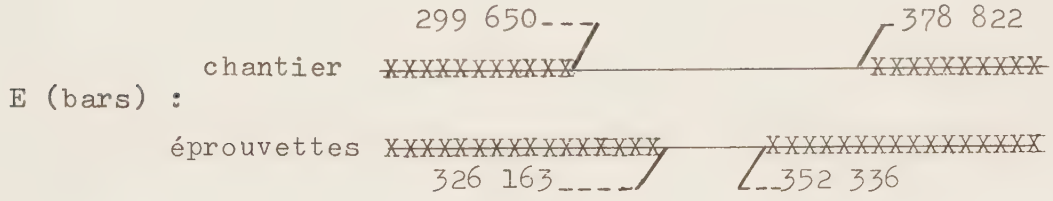
D'autre part, les valeurs mesurées sur les éprouvettes de contrôle sont : (cf. graphiques de la page 38)

	PIEU 501	PIEU 502
Valeur de E (bars)	334 000	345 000
	337 500	349 000
	334 000	337 000
	351 000	337 000
	345 000	353 000
	334 000	353 000
Moyenne arithmétique($\bar{E}$)	339 250	345 666
Ecart-type (s)	6 543	6 699
$\bar{E} + 2s$	352 336	359 065
$\bar{E} - 2s$	326 163	332 266

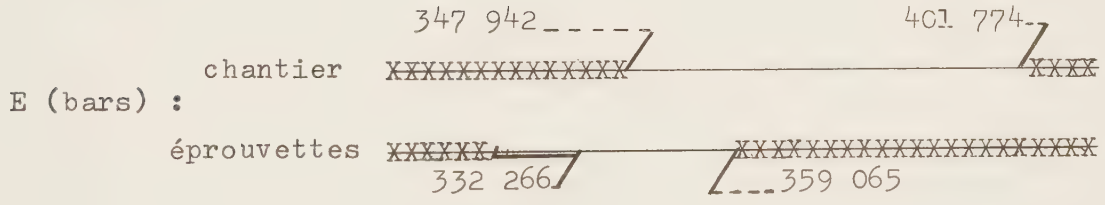
Toutes les valeurs mesurées sur les éprouvettes du pieu 501 sont situées à l'intérieur de l'intervalle déterminé par les mesures sur chantier. 50 % des valeurs obtenues sur les éprouvettes du pieu 502 sont à l'intérieur de l'intervalle déterminé sur chantier ; les autres 50 % sont légèrement inférieures à la borne inférieure de cet intervalle.

Nous résumons ces résultats sur les schémas ci-dessous :

PIEU 501 :



PIEU 502 :



°°°

Pour simplifier la comparaison entre les valeurs obtenues sur chantier et en laboratoire, il est possible de ne considérer que les moyennes arithmétiques.

Les résultats sur chantier peuvent permettre de déterminer deux valeurs moyennes :

- la première par le calcul effectué sur l'ensemble des mesures
- la deuxième par la méthode graphique (cf. page 23)

Ces deux moyennes et la moyenne obtenue sur éprouvettes en laboratoire sont reportées sur le tableau ci-dessous :

	PIEU 501		PIEU 502	
	calcul	graphique	calcul	graphique
éprouvettes ($E_{ép.}$)	339 250		345 666	
chantier ($E_{ch.}$)	339 236	340 000	374 858	367 000
erreur relative : $\frac{\lvert E_{ch.} - E_{ép.} \rvert}{E_{ép.}}$	0,004 %	0,22 %	8,44 %	6,17 %

Les erreurs relatives sont donc acceptables.

°°°

Les résultats obtenus sur chantier et au laboratoire sont compatibles. Cela montre que le principe de mesure trouvé est valable.

Remarques :

1°/- 1 bar = 1 daN/cm2

2°/- Les valeurs de E calculées suivant les courbes de compression des éprouvettes sont des valeurs calculées à charge élevée, elles sont donc légèrement inférieures à celles mesurées au chantier au moment où les pieux ne sont soumis à aucune charge. En effet, la plupart des courbes de compression ne sont pas des droites passant par l'origine (fig.8).

3°/- Nous constatons que les courbes de déformation en compression ont des points de cassure, la première pente est une fausse déformation due au glissement des pattes des extensomètres. Quand les pattes des extensomètres s'accrochent à la paroi de l'éprouvette nous avons des vraies droites de déformation. En effet, les extensomètres sont fixés contre la paroi d'une éprouvette à l'aide de deux fils élastiques. La fragilité et la sensibilité des extensomètres ne nous permettent pas d'utiliser des fils élastiques de forte tension ; tandis que la faible tension des fils élastiques ne peut pas empêcher le phénomène de glissement des pattes des extensomètres lors du début de la déformation.

A cause de ce glissement, les courbes de montée comme celles de descente ont un point de cassure (cf. les courbes de la page 38 et la figure n°9).

4°/- Dans les photos de la page 37, on aperçoit l'apparition des ondes secondaires pour un décalage du niveau de 3 mètres entre émetteur et capteur. Cela signifie que, à ce niveau, l'énergie des ondes secondaires est plus forte que celle des ondes longitudinales (ou primaires). C'est l'inter-zone de la figure n°6, page 19.

Remarques :

1°/- 1 bar = 1 daN/cm2

2°/- Les valeurs de E calculées suivant les courbes de compression des éprouvettes sont des valeurs calculées à charge élevée, elles sont donc légèrement inférieures à celles mesurées au chantier au moment où les pieux ne sont soumis à aucune charge. En effet, la plupart des courbes de compression ne sont pas des droites passant par l'origine (fig.8).

3°/- Nous constatons que les courbes de déformation en compression ont des points de cassure, la première pente est une fausse déformation due au glissement des pattes des extensomètres. Quand les pattes des extensomètres s'accrochent à la paroi de l'éprouvette nous avons des vraies droites de déformation. En effet, les extensomètres sont fixés contre la paroi d'une éprouvette à l'aide de deux fils élastiques. La fragilité et la sensibilité des extensomètres ne nous permettent pas d'utiliser des fils élastiques de forte tension ; tandis que la faible tension des fils élastiques ne peut pas empêcher le phénomène de glissement des pattes des extensomètres lors du début de la déformation.

A cause de ce glissement, les courbes de montée comme celles de descente ont un point de cassure (cf. les courbes de la page 38 et la figure n°9).

4°/- Dans les photos de la page 37, on aperçoit l'apparition des ondes secondaires pour un décalage du niveau de 3 mètres entre émetteur et capteur. Cela signifie que, à ce niveau, l'énergie des ondes secondaires est plus forte que celle des ondes longitudinales (ou primaires). C'est l'inter-zone de la figure n°6, page 19.

Courbe de déformation des éprouvettes
de béton en compression

F i g . 8

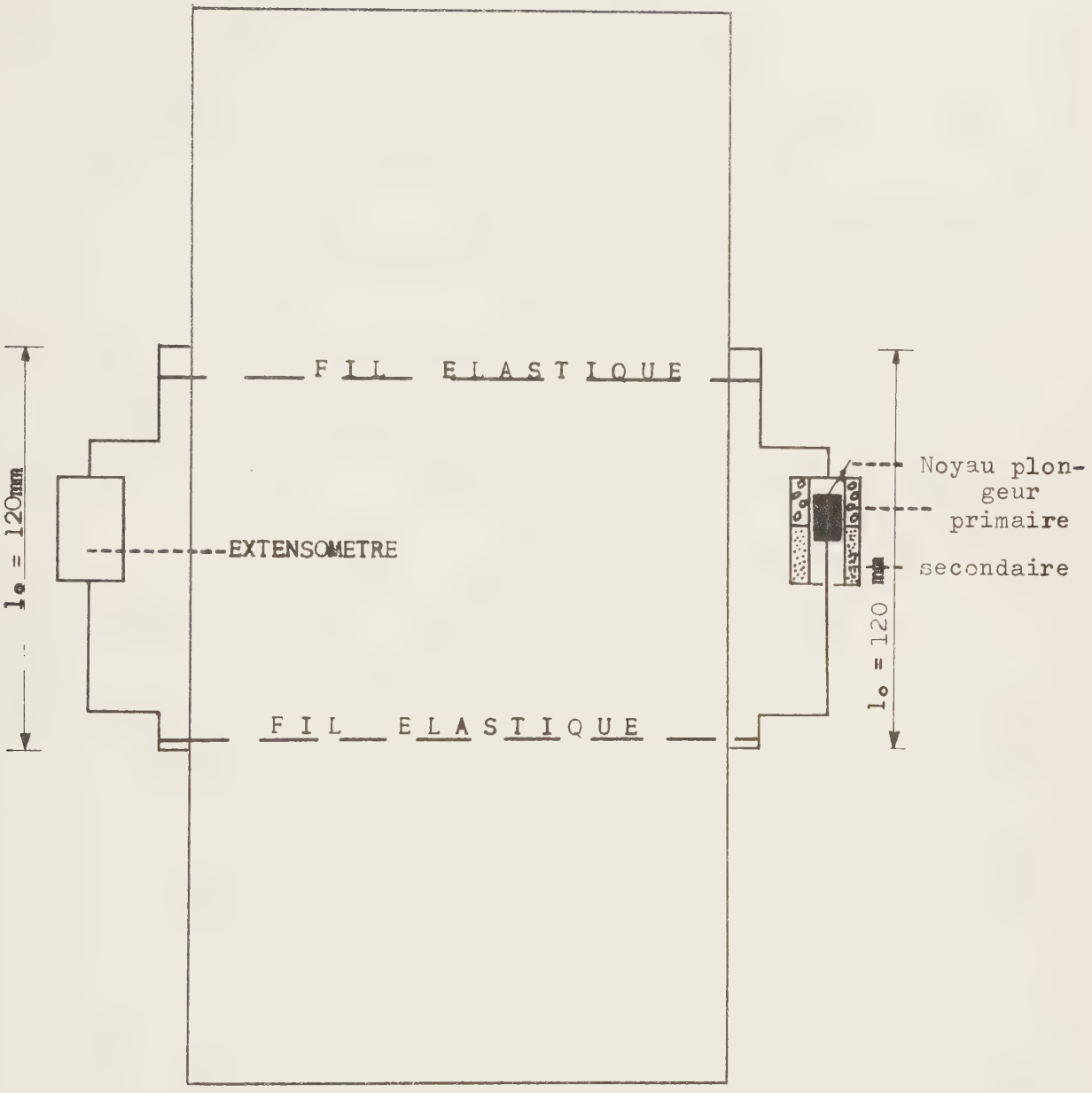


Fig.9

Fixation des extensomètres contre une éprouvette de béton

(dans la mesure en compression)

PHOTOS OBTENUES LORS DES MESURES D'AUSCULTATION.

DYNAMIQUE DES PIEUX DU CHANTIER A.15 - P.I.6. A L'AGE DE 85 ET 87 JOURS

et

COURBES "RACCOURCISSEMENT-CHARGE" OBTENUES LORS DES MESURES DU MODULE E AU LABORATOIRE SUR LES EPROUVETTES DE BETON DE MEME NATURE QUE LES PIEUX AUSCULTES A L'AGE DE 89 ET 91 JOURS.

Remarques :

PHOTOS :

- L'abscisse représente l'axe de temps. Un carreau est une division qui représente la base de temps utilisée.
- L'ordonnée représente l'énergie reçue après avoir été amplifiée 2.000 fois. Un carreau est une division qui représente une tension de 5 volts.

COURBES :

- L'abscisse représente le raccourcissement amplifié 1.000 fois ($\Delta x = 1.000\ \Delta l$) pour une longueur initiale de 120 mm (1 carreau = 1 cm)
- L'ordonnée représente la charge. Une longueur de 20 carreaux (= 20 cm) correspond à une charge de 50.000 daN.

Le module E est calculé par la formule $\frac{F}{S_o} = E \frac{\Delta l}{l_o}$

Donc :

$$E^{daN/cm^2} = \frac{F^{daN}}{200cm2} \cdot \frac{120}{\Delta x\ (mm) \times 10^{-3}}$$

CHANTIER A.15

P1.6 — pieu 501

coulage le 1.3.72

mesure le 25.5.72

âge : 85 jours

Emetteur

0,65 m

m

-0,30

-0,20

-0,10

0,00

0,10

0,20

0,30

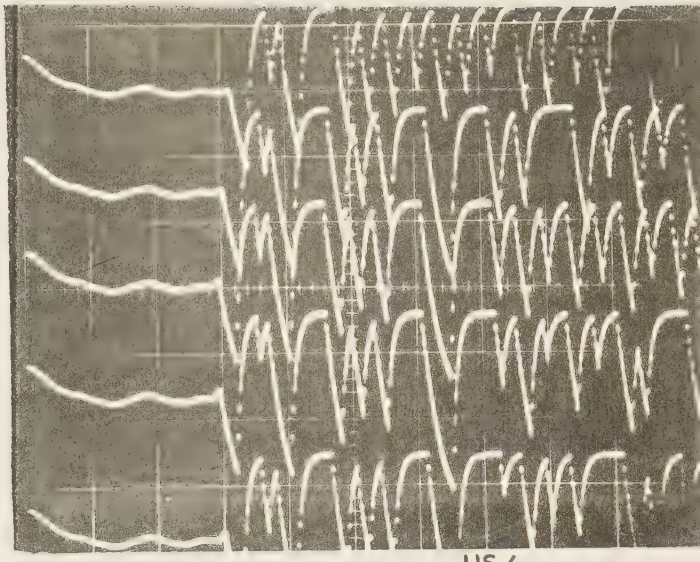
0,40

0,50

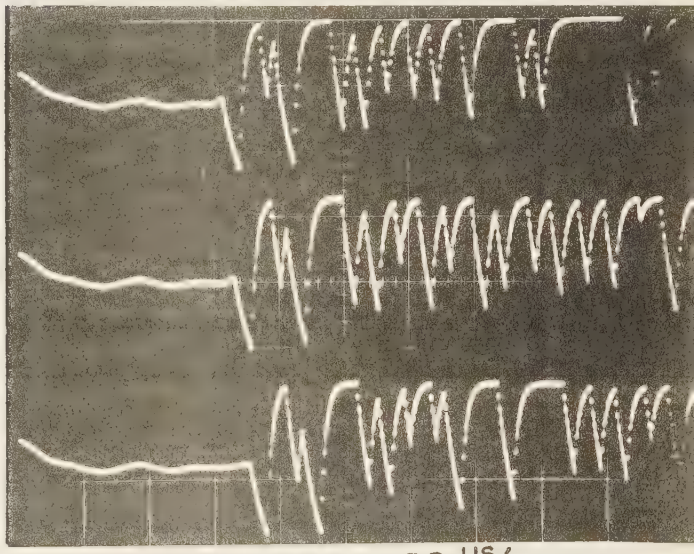
0,60

0,70

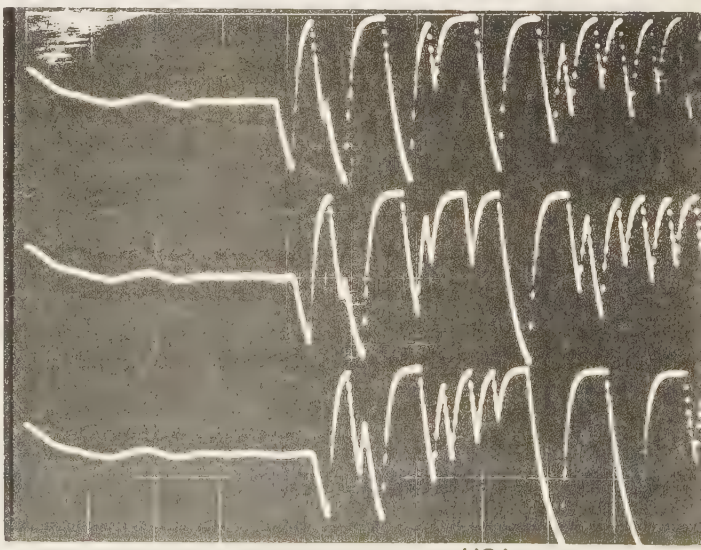
Amplitude : 5 volts/division — Base de Temps : variable



base de temps : 50 µs/division



base de temps : 50 µs/division



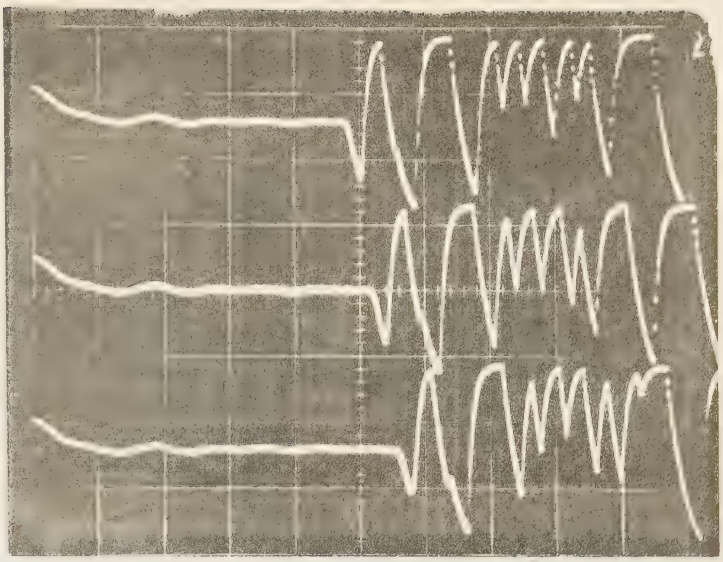
base de temps 50 µs/division

15 _ P16
pieu 501
25_5_72

0,80

0,90

1,00

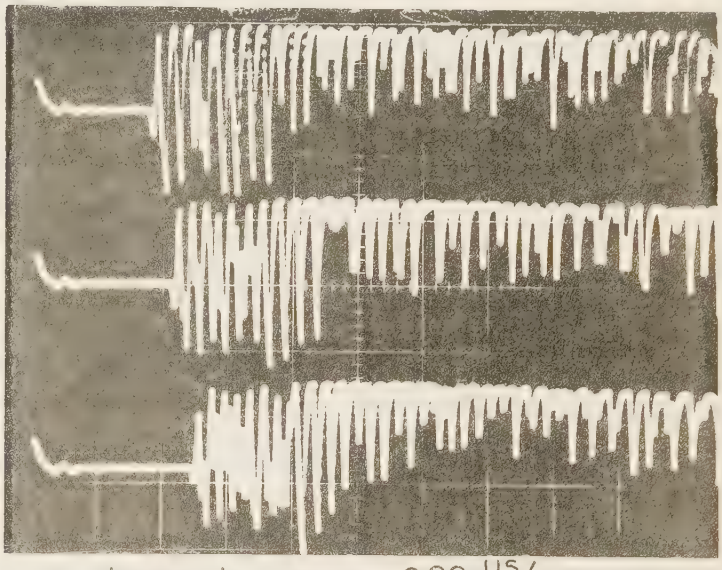


base de temps: 50 µs/division

1,30

1,60

1,90

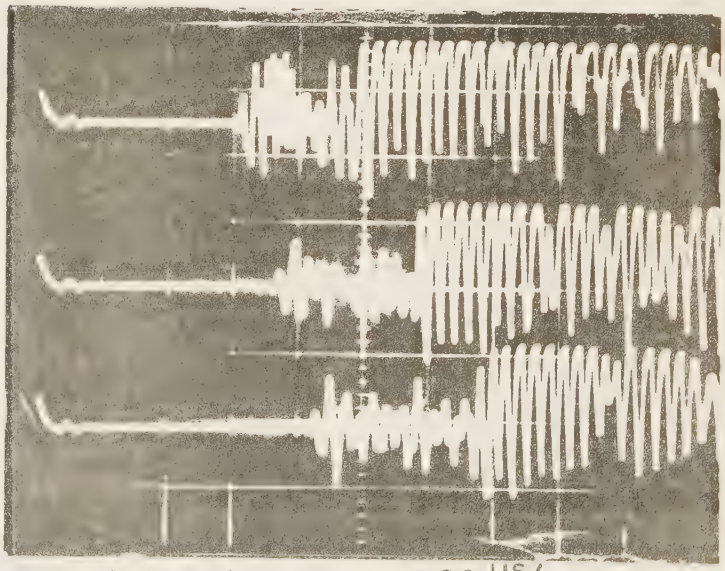


base de temps: 200 µs/division

2,40

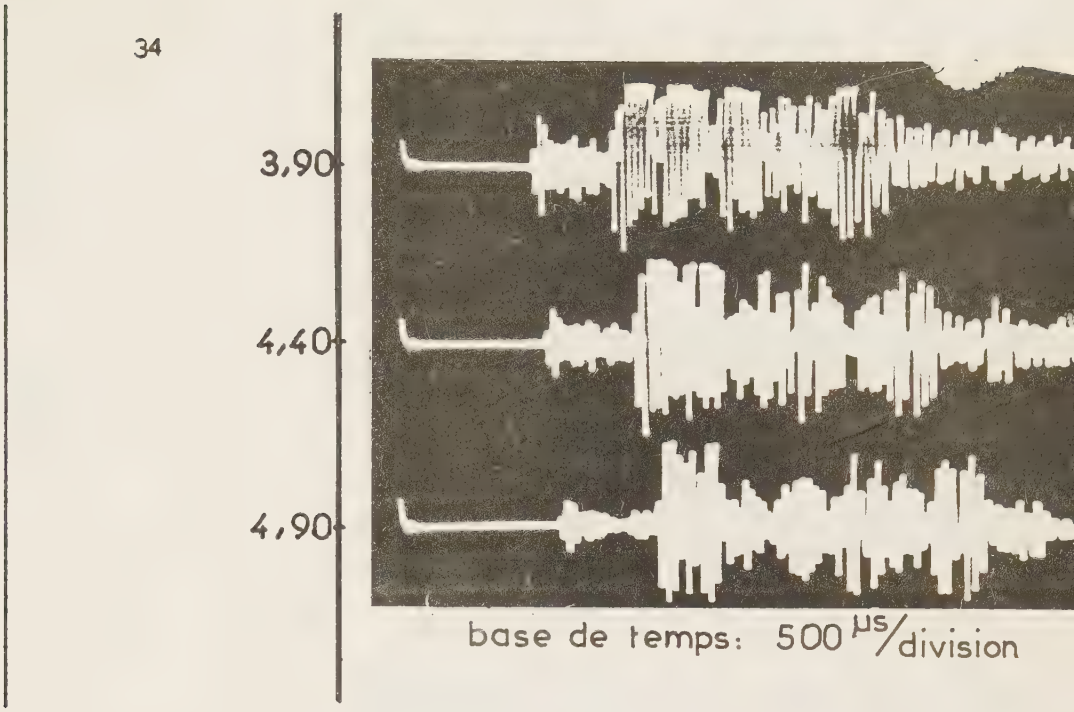
2,90

3,40



base de temps: 200 µs/division

A. 15 _ P.I. 6
pieu 501
25_5_72

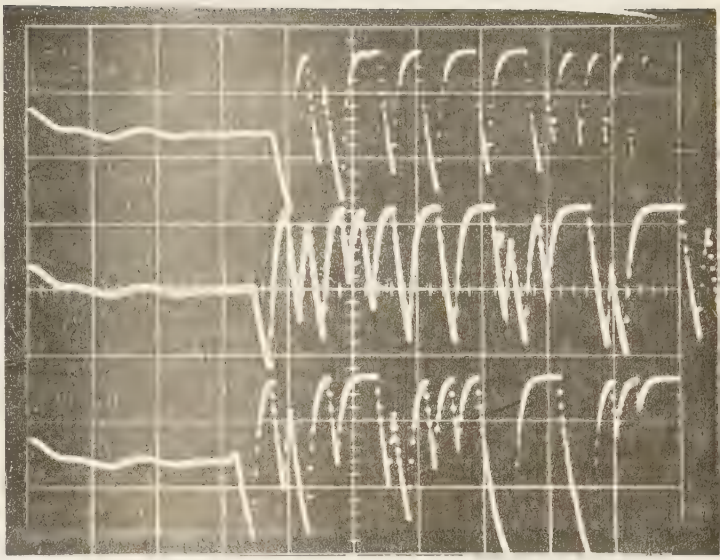


CHANTIER A.15
.1. 6 _ pieu 502
oulage le 29-2-72
nesure le 26-5-72
ge: 87 jours

mplitude: 5 volts/division
ASE de TEMPS: variable

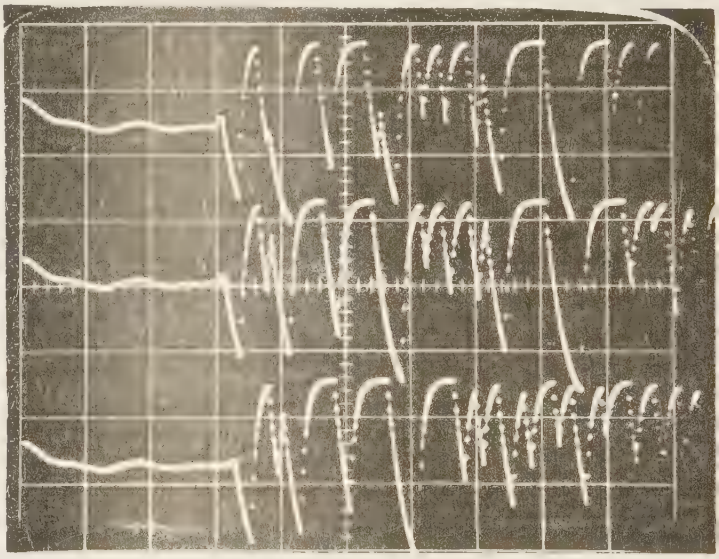
émetteur
"10m. au dessous de la tête du pieu"
10 m.
m 0,65

m
-0,45
-0,30
-0,15



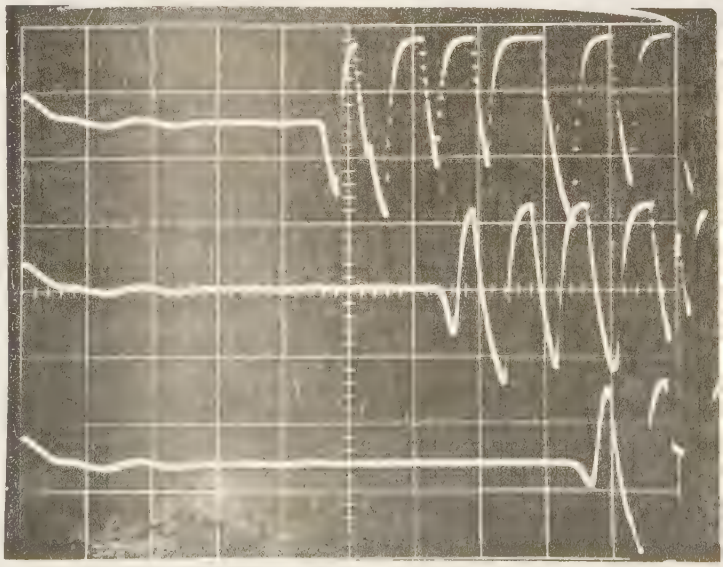
base de temps 50 µs/div.

0,15
0,30



base de temps 50 µs/division

0,80
1,30
1,80



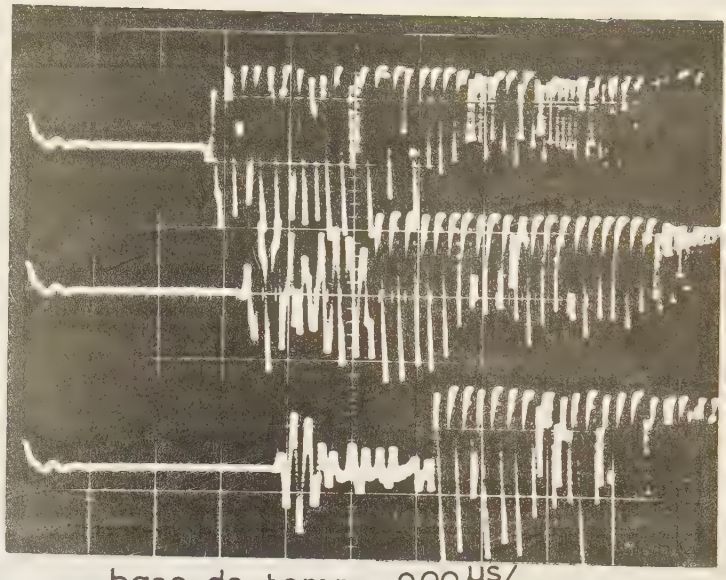
base de temps 50 µs/division

A. 15 _ P.I. 6
pieu 502
26_5_72

m
2,30

m
2,80

3,30

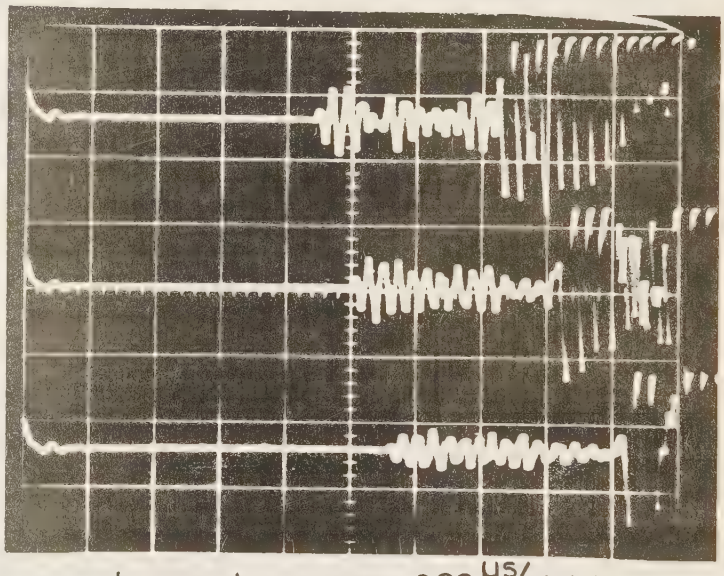


base de temps 200 µs/division

3,80

4,30

4,80

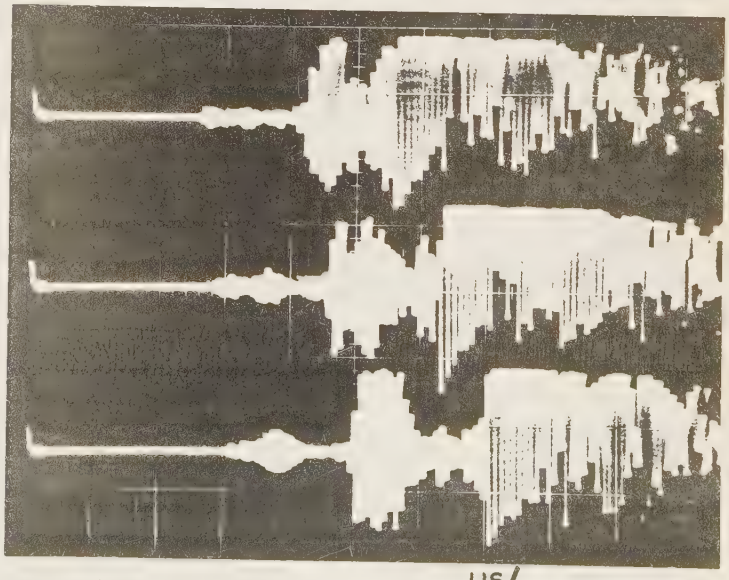


base de temps 200 µs/division

5,30

5,80

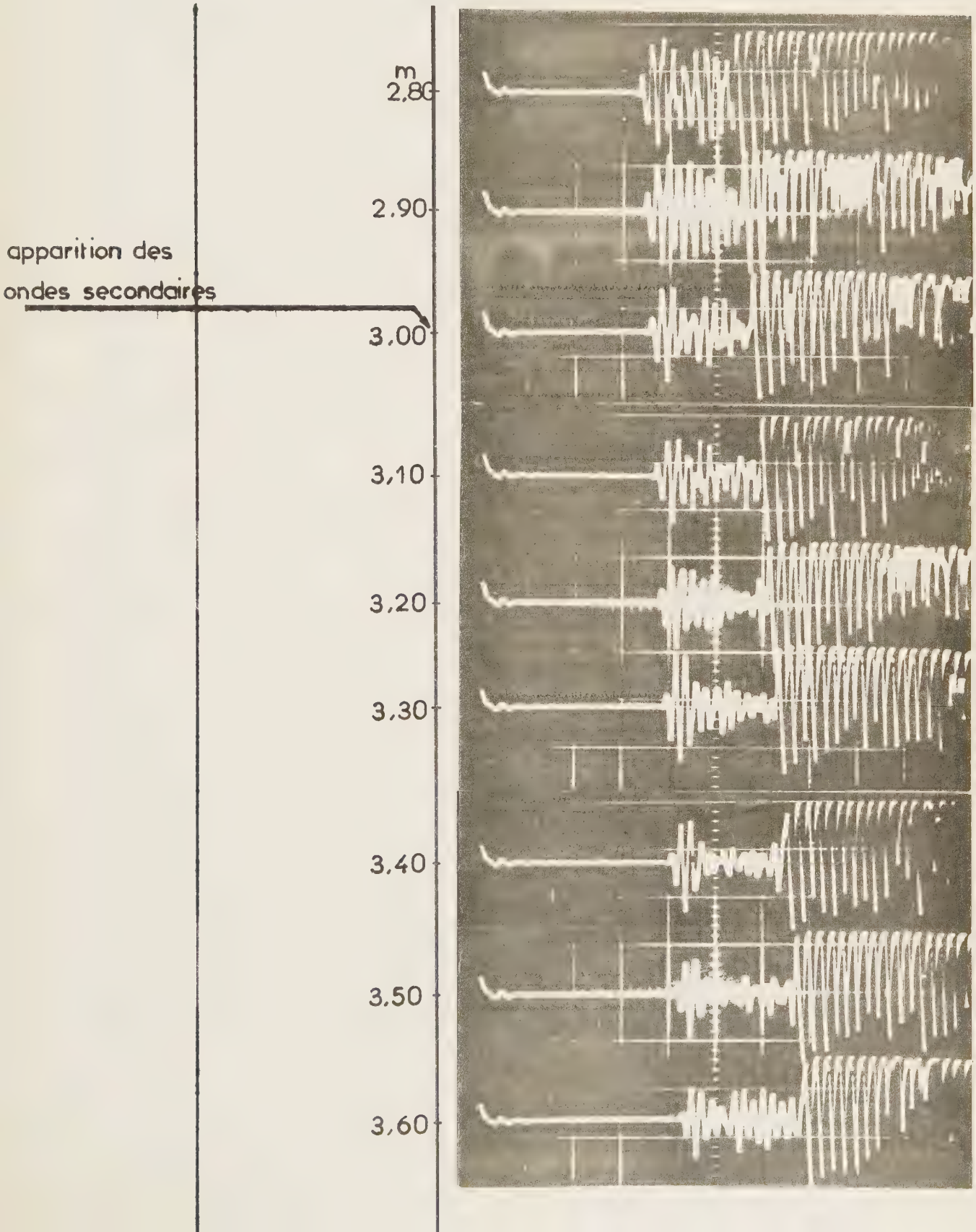
6,30

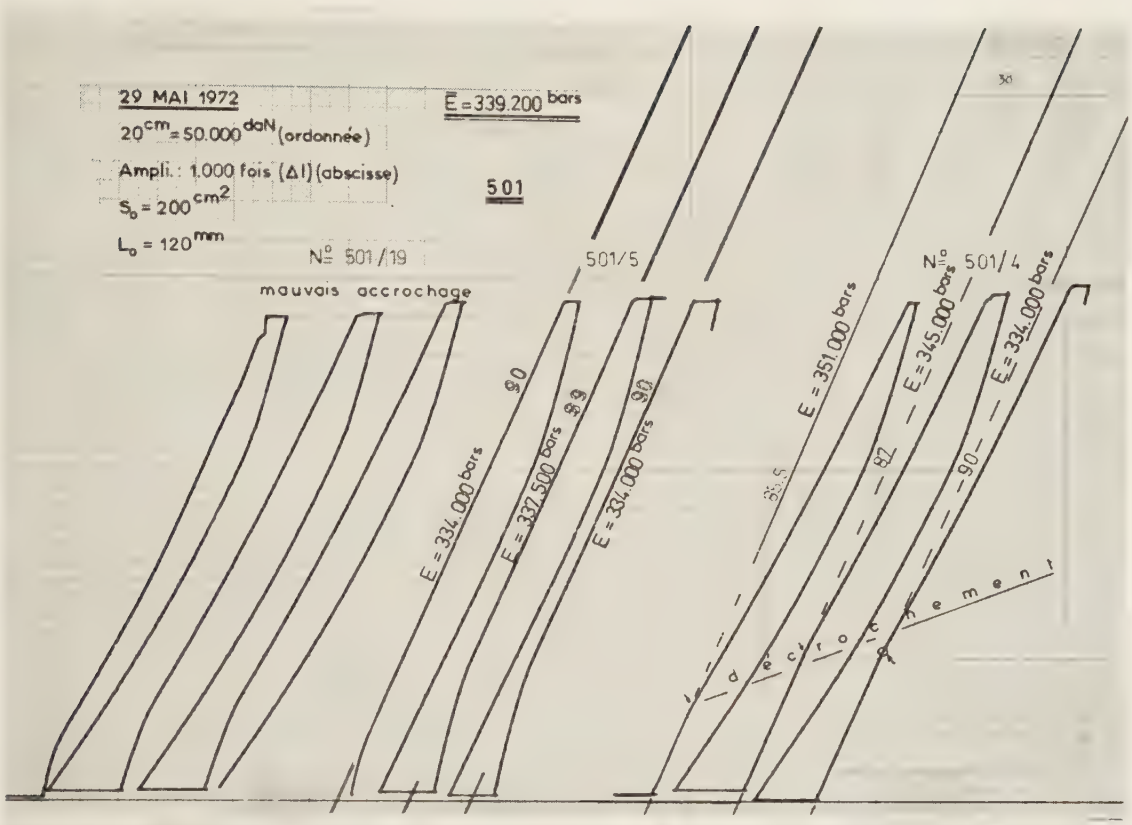


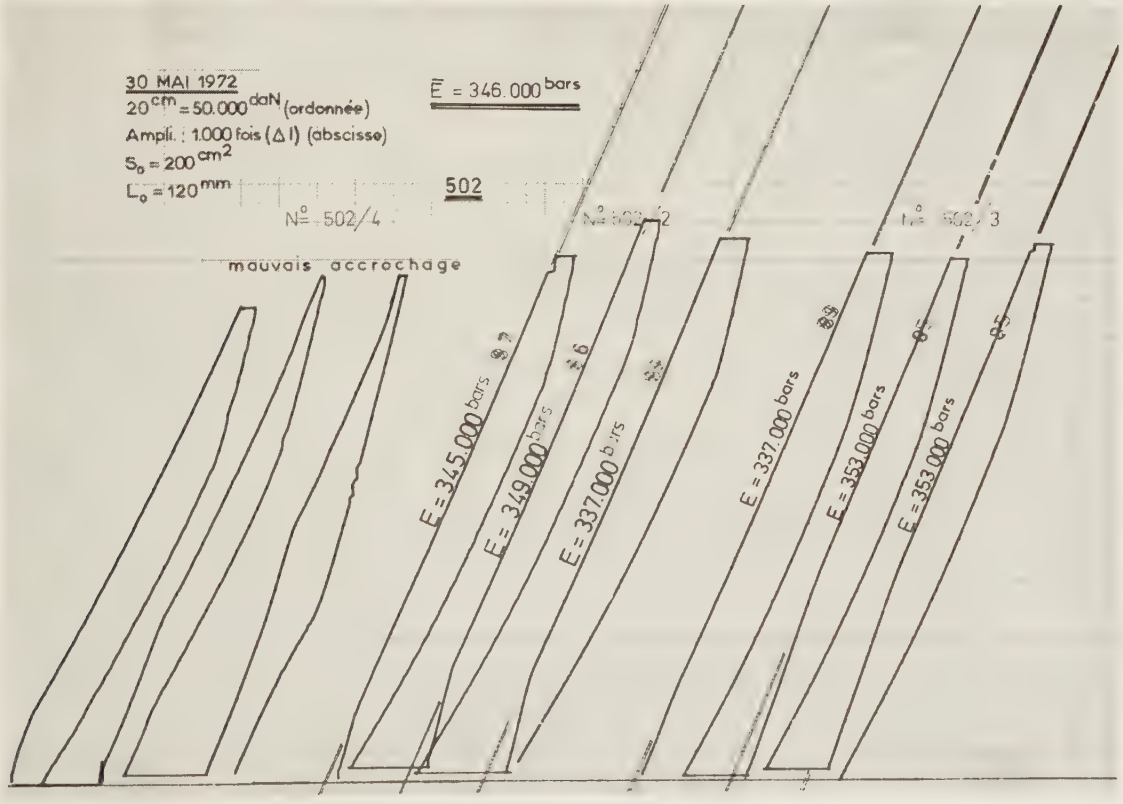
base de temps 500 µs/division

Mesures serrées dans l'inter-zones ($2{,}80^{m}$-$3{,}60^{m}$)
— A.15 – P.1.6 – pieu 502 — mesure le 26.5.72 —

Amplitude : 5 volts/div. — Base de temps : 200 µs/div.




29 MAI 1972
$\bar{E}$ = 339.200 bars
20 cm = 50.000 daN (ordonnée)
Ampli. : 1.000 fois (Δl) (abscisse)
S_o = 200 cm²
L_o = 120 mm
501
N° 501/19
mauvais accrochage
501/5
E = 334.000 bars
E = 337.500 bars
E = 334.000 bars
N° 501/4
E = 351.000 bars
E = 345.000 bars
E = 334.000 bars
Ecrouissage


30 MAI 1972
$\bar{E}$ = 346.000 bars
20 cm = 50.000 daN (ordonnée)
Ampli. : 1.000 fois (Δl) (abscisse)
S_o = 200 cm²
L_o = 120 mm
502
N° 502/4
mauvais accrochage
N° 502/2
N° 502/3
E = 345.000 bars
E = 349.000 bars
E = 337.000 bars
E = 337.000 bars
E = 353.000 bars
E = 353.000 bars

CHAPITRE III

-:-

METHODE DE MANIPULATION

-:-

A - Appareillages utilisés

Les appareils que nous avons utilisés dans cette étude sont :

- 1 générateur d'impulsion de 15 000 volts
- 1 émetteur de Quartz cylindrique creux de dimensions :

  $\emptyset$ = 25 mm ; L = 50 mm
- 1 capteur piézoélectrique
- 1 préamplificateur à transistors au gain de 2 000
- 1 oscilloscope cathodique.

Ce sont les appareils de chantier qui nous permettent d'ausculter des grosses masses de béton. Leur puissance de pénétration est de l'ordre de 15 mètres.

Dans le laboratoire, on n'a besoin que d'un appareil de faible puissance ; une puissance de pénétration d'un mètre est largement suffisante.

B - Rôle des appareils

- Le générateur d'impulsion émet des impulsions de 15 000 volts. Cette tension actionne l'émetteur de Quartz. Le générateur d'impulsion est un circuit électronique qui se compose de deux parties :

  - CIRCUIT DE PILOTE
  - CIRCUIT DE PUISSANCE

Le circuit de pilote donne la forme du signal à trois caractéristiques suivantes :

- nombre de créneaux dans une impulsion
- fréquence des ondes émises (environ 45 KHz)
- largeur d'un créneau

Le signal sorti de ce circuit est injecté dans le circuit de puissance pour être amplifié jusqu'à 15 000 volts. Cette tension actionnera le Quartz de l'émetteur.

- Le Quartz de l'émetteur émet des ondes sonores de même fréquence que celle du signal de sortie du circuit de pilote. Par la forme cylindrique creux du Quartz utilisé, l'émetteur nous donne des ondes cylindriques concentriques (cf. page 42).

- Les ondes sonores reçues par le capteur piézoélectrique sont transformées en courant électrique, à l'aide de la caractéristique du Quartz, puis amplifié 2 000 fois avant d'être envoyé à l'oscilloscope cathodique.

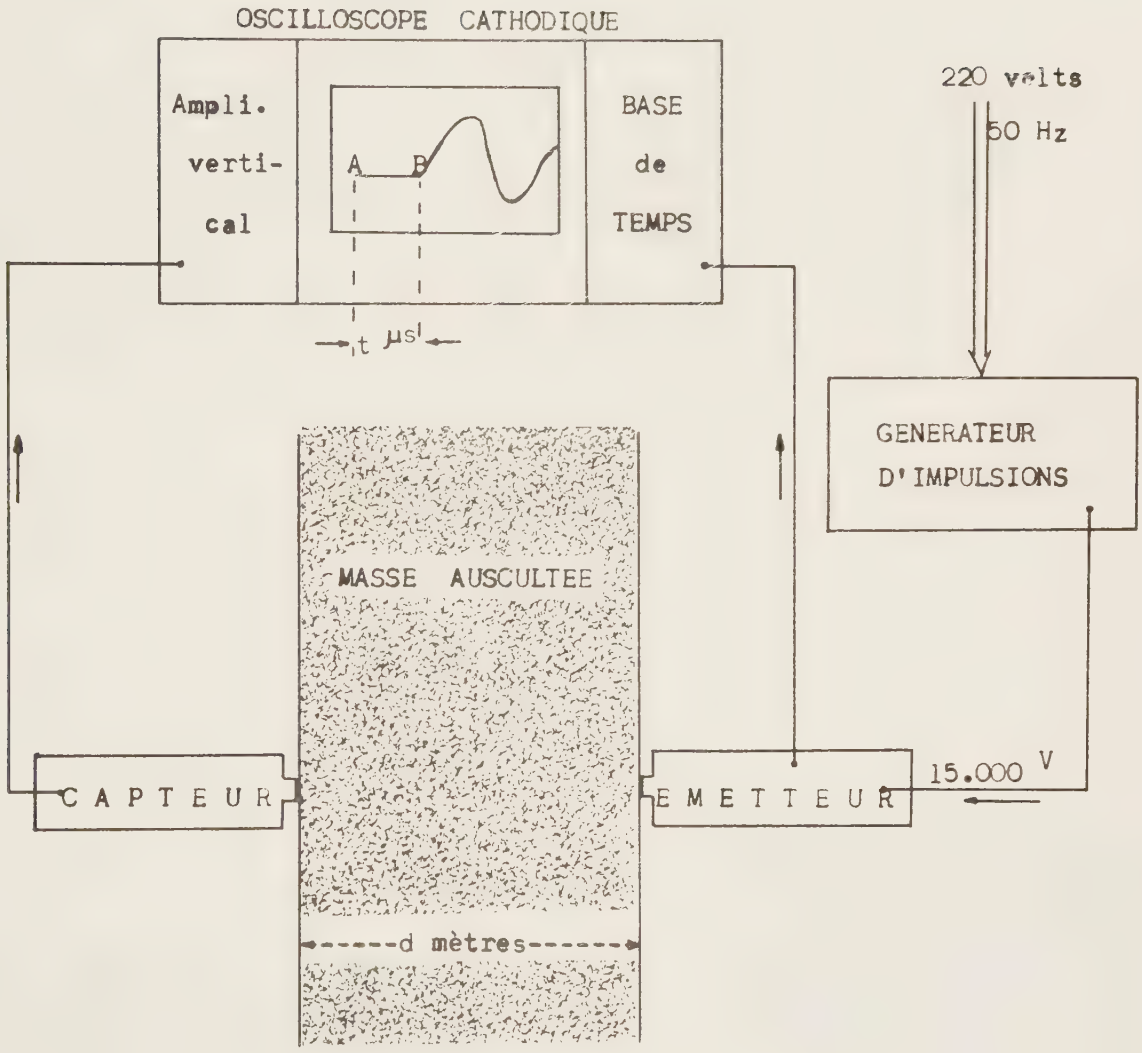
- L'oscilloscope cathodique se compose de trois parties :
  . un tube cathodique (WEHNELT) - partie centrale -
  . un tiroir de base de temps - aile gauche -
  . un tiroir d'amplificateur - aile droite

Le départ du SPOT dans le tube Wehnelt correspond au moment où les ondes sonores sortent de l'émetteur.

La déformation du signal dans le tube de Wehnelt correspond au moment où les ondes arrivent au capteur.

C - Chaîne de montage

F i g . 10



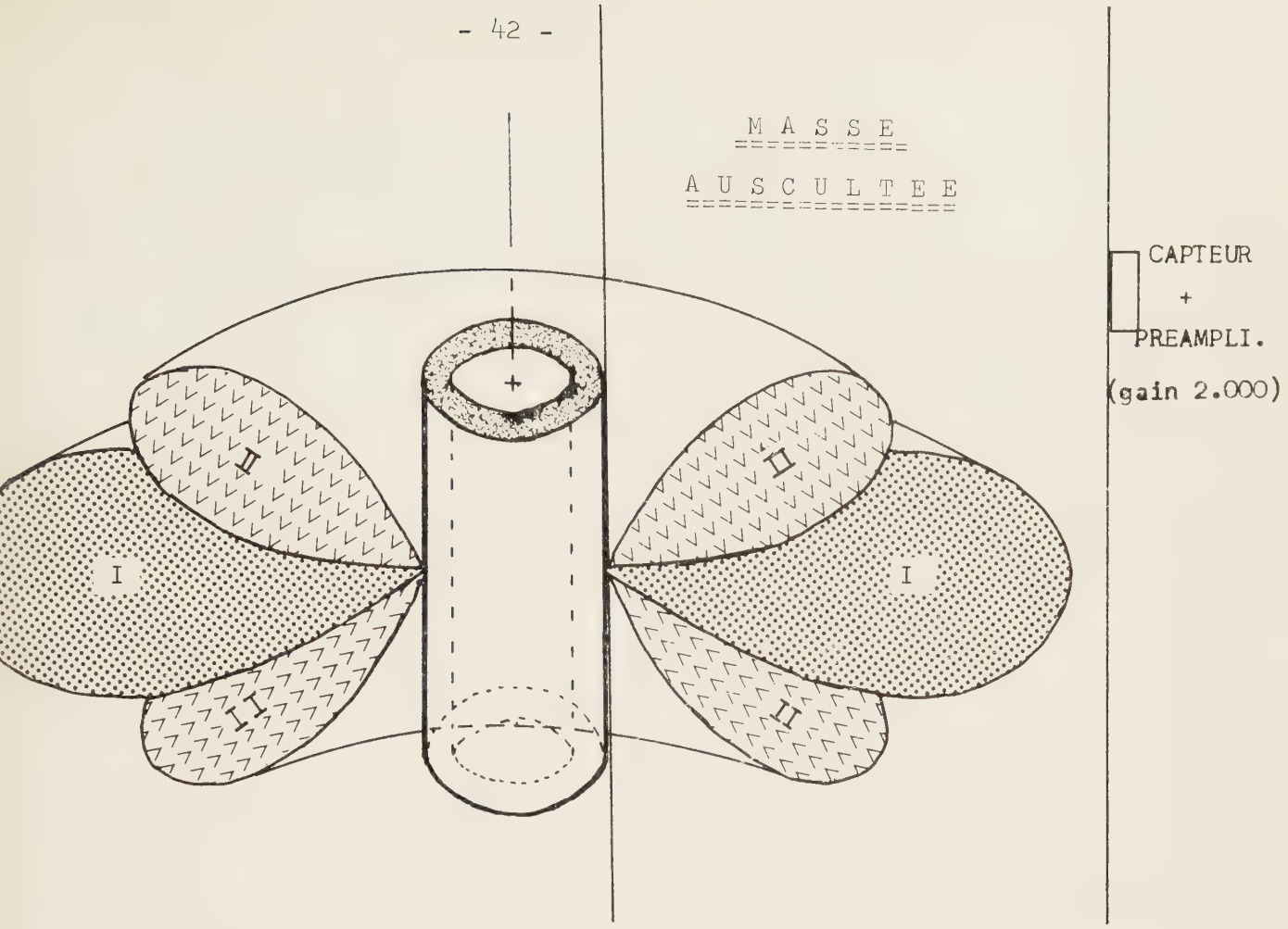
CHAINE D'AUSCULTATION DYNAMIQUE

(mesure le temps de propagation)

t : temps de propagation apparent

A : correspond au moment de départ des impulsions

B : marque l'instant d'arrivée des ondes au capteur.



Faisceaux d'énergie des ondes émises par un émetteur à Quartz cylindrique de coupe suivant l'axe $\overrightarrow{OX}$

(I) : Faisceau d'énergie des ondes longitudinales

(II) : Faisceau d'énergie des ondes transversales.

A P P A R E I L L A G E

D - Méthode de pointage

Dans les mesures il existe toujours des erreurs de mesure dues au pointage et au retard de réponse. Si le temps mesuré est de l'ordre de quelques centaines de microsecondes il faut tenir compte de leur présence. Au contraire, si le temps de propagation est élevé, ces erreurs deviendront négligeables et on peut les considérer comme nulles. Notre appareillage a un retard total de réponse de l'ordre d'une dizaine de microsecondes.

LE RETARD DE REPONSE "T_o"

Une réponse n'arrive jamais instantanément. Elle arrive toujours en retard. Le retard de réponse s'appelle "RETARD DE TEMPS".

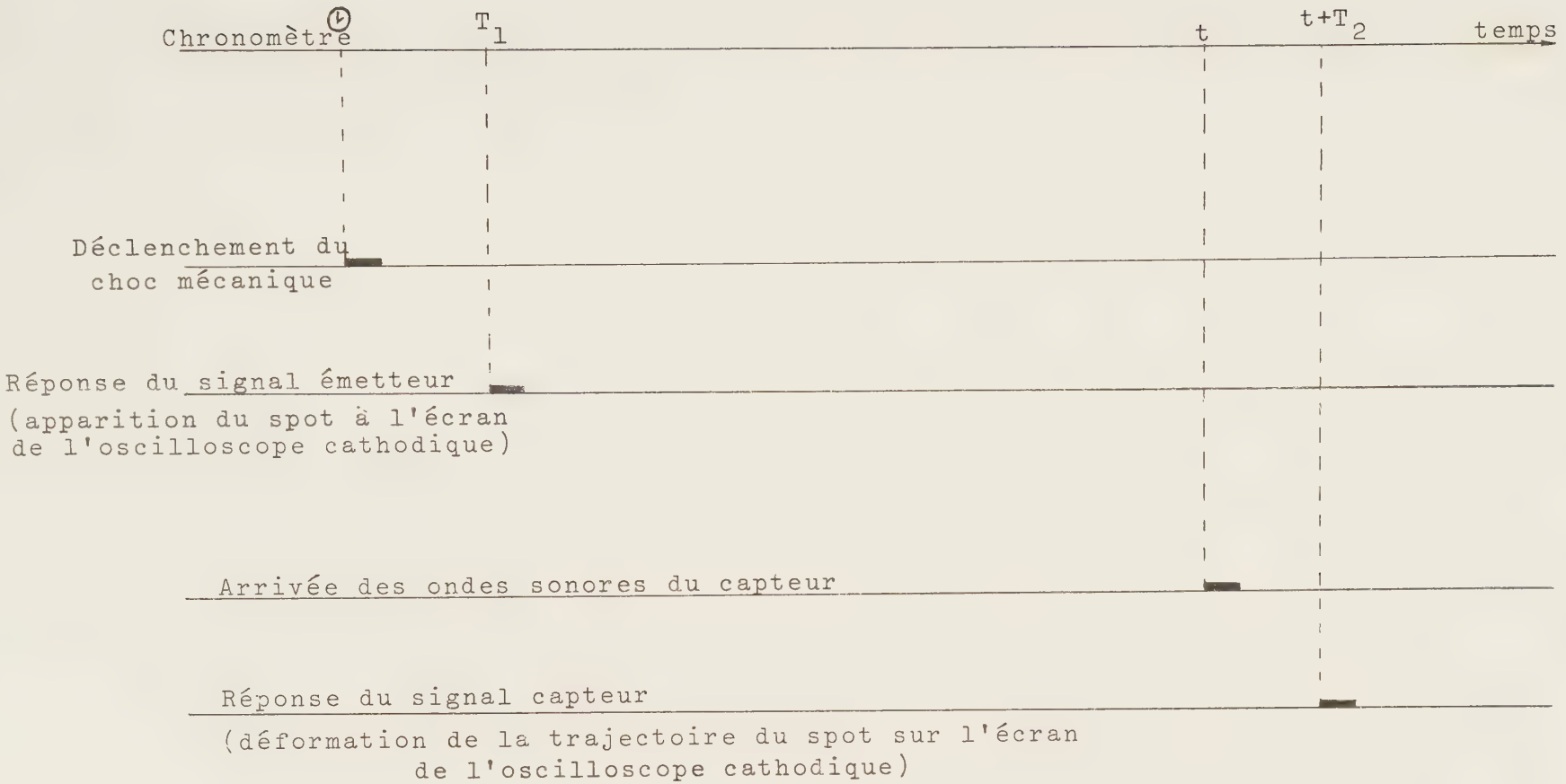
Dans notre mesure, nous avons deux signaux qui arrivent à l'oscilloscope cathodique :

a/ le signal provenant de l'émetteur

b/ " " du capteur

Donc nous avons deux retards de temps T_1 et T_2. Ces retards sont dus à la réponse lente du Quartz ; à la réponse lente des éléments électroniques (ce type de retard varie avec la fréquence utilisée) ; à la propagation des ondes électriques dans des câbles, etc..

Pour calculer ces retards, nous schématisons par les figures ci-dessous :


Chronomètre
T_1
t
$t+T_2$
temps
Déclenchement du choc mécanique
Réponse du signal émetteur
(apparition du spot à l'écran de l'oscilloscope cathodique)
Arrivée des ondes sonores du capteur
Réponse du signal capteur
(déformation de la trajectoire du spot sur l'écran de l'oscilloscope cathodique)

Nous voyons que le temps réel de propagation est "t". Tandis que sur l'écran de l'oscilloscope cathodique nous ne mesurons que :

$$T = t + T_2 - T_1$$

$$= t + (T_2 - T_1)$$

Le terme $T_2 - T_1$ est dit RETARD DE TEMPS de l'ensemble des mesures, et on a l'habitude de poser

$$T_o = T_2 - T_1$$

D'après cette explication le retard de temps T_o peut être positif, négatif ou nul. Cela dépend de la caractéristique de l'appareillage et de la fréquence utilisés.

E - Mesure de la masse volumique " ρ "

On utilise le gammadensimètre pour mesurer la densité d'une masse auscultée. C'est un appareil qui émet des photons γ , ceux-ci passent à travers une masse auscultée et y sont absorbés en partie.

La quantité absorbée par le milieu ausculté est fonction de la masse totale ($M = \rho.S.H$) de la zone traversée par les photons γ . D'où la densité. Cet appareil nous donne des résultats avec une erreur relative maximale de 3 %.

Cette méthode de mesure est utilisée dans les laboratoires des Ponts et Chaussées.

H : l'épaisseur de la masse auscultée

M : la masse

ρ : la densité

S : la surface traversée par les photons γ, réglée par l'objectif de l'appareil.

F - Calcul des facteurs " σ " et "E"

Calcul du coefficient de Poisson " σ " :

Utilisons les relations (12) et (16)

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \qquad (12)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{2(1+\sigma)}} \qquad (16)$$

pour calculer le coefficient de Poisson σ . A partir de ces deux relations nous tirons :

$$K = V_T/V_L = \sqrt{\frac{1-2\sigma}{2-2\sigma}}$$

$$\boxed{\sigma = \frac{1-2K^2}{2-2K^2}} \qquad (19)$$

K est mesuré par la méthode "D'OUVERTURE D'ENERGIE" décrite dans le chapitre II.

Calcul du module d'élasticité "E" :

La valeur de E est calculée par la formule :

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \qquad (12)$$

Les valeurs V_L, ρ et σ sont mesurées et calculées comme nous l'avons indiqué dans les paragraphes précédents et on y tire facilement la valeur de E.

$$\boxed{E = V_L^2 . \rho \frac{(1+\sigma)(1-2\sigma)}{1-\sigma}}$$

G - Estimation de la résistance de rupture "R_c"

D'après nos essais, nous avons trouvé que la valeur dynamique du module d'élasticité de YOUNG (E) est indépendante de la vitesse de charge et du facteur d'élancement. Elle dépend du dosage et de l'âge du béton.

La déformation du béton sous la charge n'est pas toujours une droite comme la loi de Hooke ($\frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l_o}$), mais c'est une courbe du type ci-dessous :

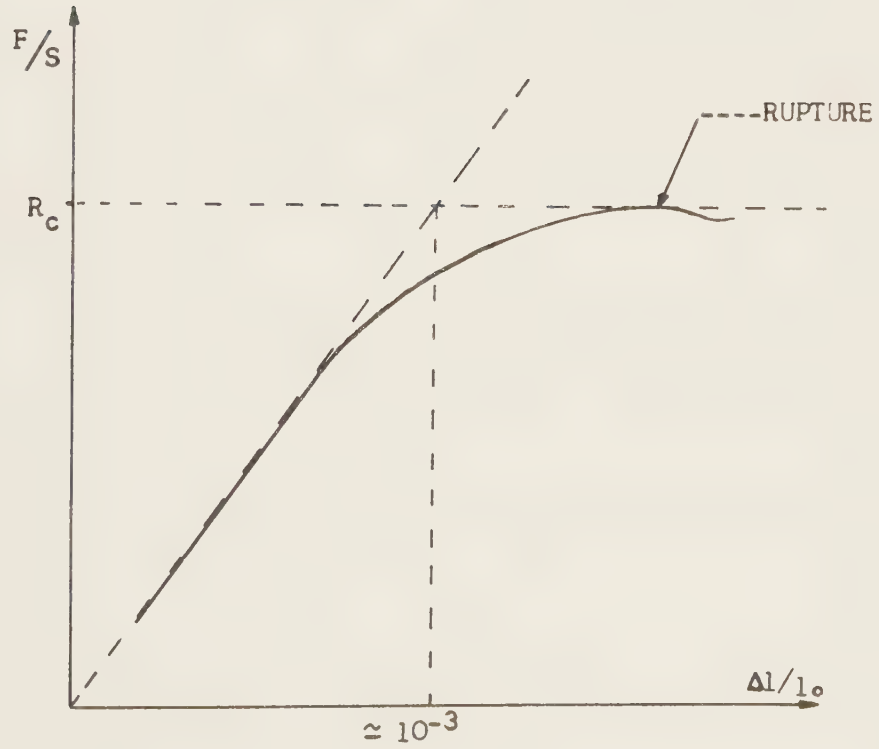


Fig. 11

Si nous prenons la pente de la tangente à l'origine de la courbe comme la valeur E dynamique, nous trouvons que R_c est la valeur de $\frac{F}{S_o}$ au moment où $\frac{\Delta l}{l_o}$ est égale à :

- 10^{-3} (on a 30 % de probabilité)
- entre $0{,}85.10^{-3}$ et $0{,}95.10^{-3}$ on a 19 % de probabilité
- $1{,}1.10^{-3}$ (on a 8,5 % de probabilité)

Donc, avec une probabilité de 0,57 on a la relation ci-dessous :

$$0{,}85.10^{-3}.E \leqslant R_c \leqslant 1{,}1.10^{-3}.E \qquad (21)$$

Sa valeur normale est de 10^{-3}. Donc

$$\boxed{R_c \simeq 10^{-3}.E} \qquad (22)$$

Le coefficient 10^{-3} n'est donné que pour calculer R_c .

Dans la réalité, le rapport $\frac{\Delta l}{l_o}$ à la rupture a parfois une valeur supérieure à 10^{-3}. (cf. figure 11, page 47)

Valeur dynamique : Valeur mesurée avec une vitesse de charge.

Vitesse de charge : Variation de la charge pendant l'unité de temps

Elancement : Rapport de la longueur d'une éprouvette cylindrique sur son diamètre (l_o/ϕ_o) .

Les relations (21) et (22) ne sont appliquées qu'aux élancements supérieurs à deux. Car R_c varie avec les petits élancements, et elle est indépendante de grands élancements.

A titre indicatif, nous donnons ici quelques résultats de nos mesures sur les éprouvettes de béton de différents dosages :

Contrainte	Probabilité pour que l'Ouvrage puisse supporter la contrainte sans être détérioré
$R_c \leqslant 0,4.10^{-3}E$	1,00
$R_c = 0,6.10^{-3}E$	0,90
$R_c = 0,80.10^{-3}E$	0,75
$R_c = 10^{-3}E$	0,23
$R_c = 1,3.10^{-3}E$	0,000000

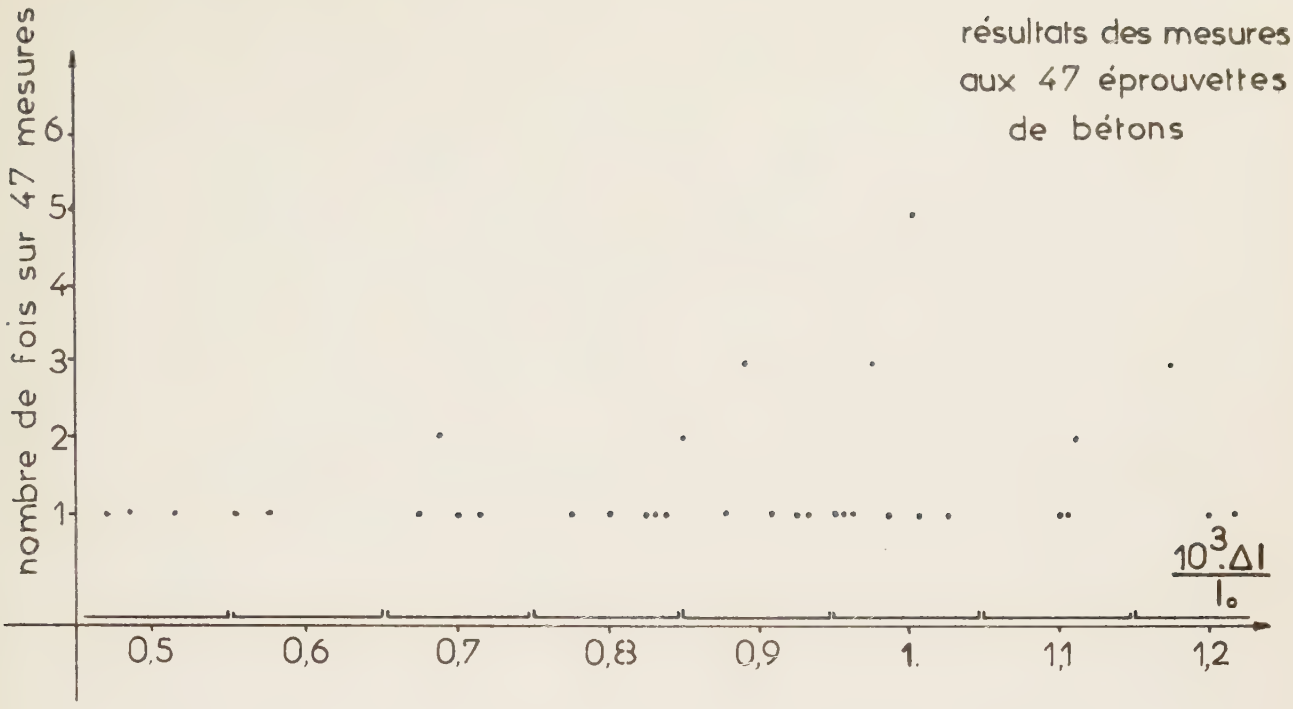
°°°

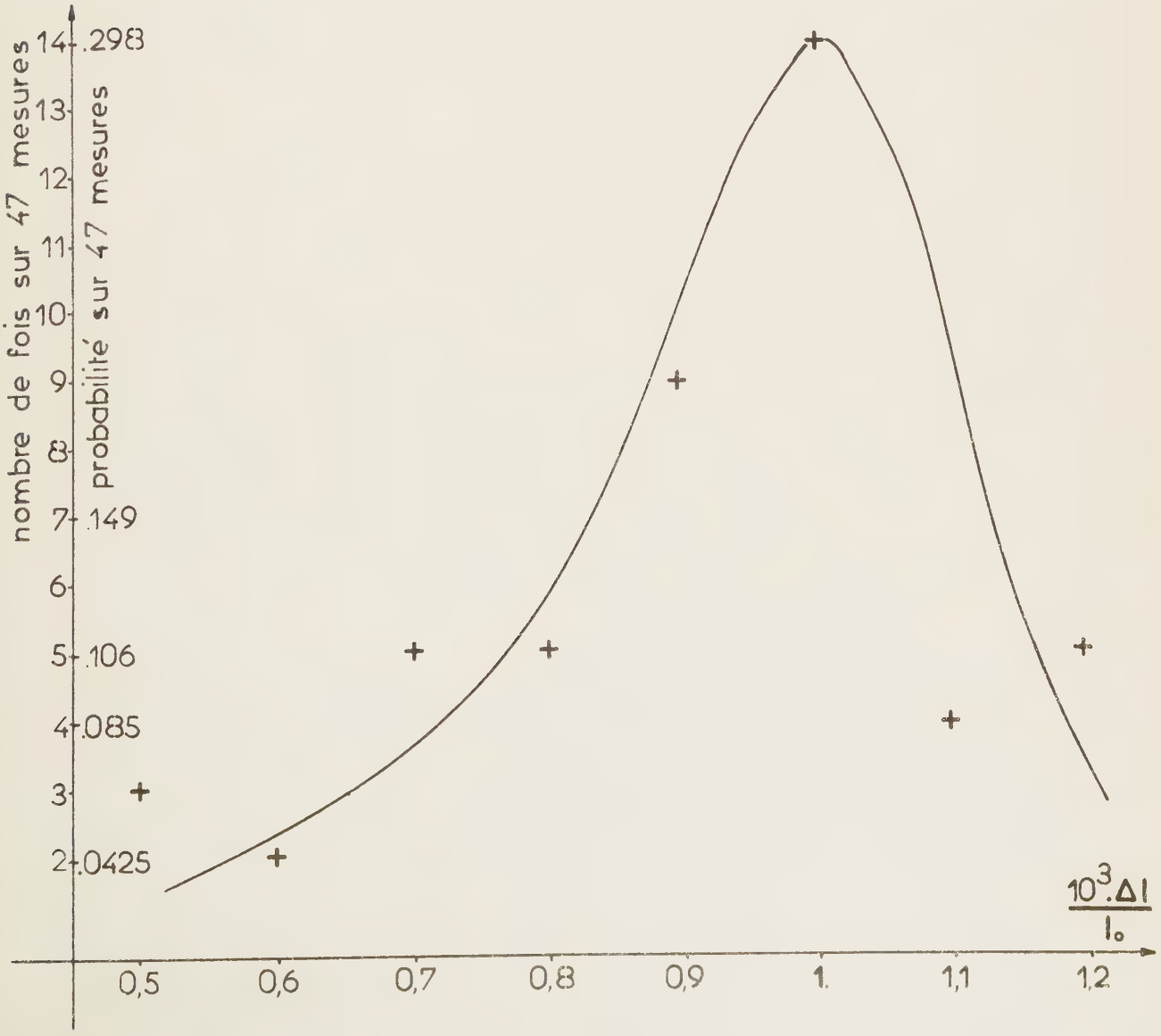
Dans la pratique, la contrainte admissible prise en compte dans le calcul des Ouvrages d'Art est la limite inférieure estimée de R_c . D'où, cette contrainte maximale sera :

$$R_c = 0,4 \cdot 10^{-3} E$$

(Les résultats de nos essais sont rassemblés dans la page 50 sous la forme graphique).

résultats des mesures
aux 47 éprouvettes
de bétons





C O N C L U S I O N

-:-

Dans cette étude nous avons décrit une méthode permettant de mesurer les vitesses de propagation des ondes secondaires, et nous l'avons appliquée aux contrôles des Ouvrages d'Art. Les résultats obtenus au chantier A.15 - P.I.6 (ARGENTEUIL) sont encourageants. Cela montre que le principe de mesure trouvé est valable.

On peut également étendre cette méthode à d'autres contrôles tels que ceux des monuments historiques, etc ...

.°.

Dans le cas où l'Ouvrage d'Art n'a qu'une seule surface accessible, on peut appliquer également cette méthode soit en inclinant l'émetteur, ce qui revient à changer la direction de propagation des faisceaux d'énergie principaux, soit en utilisant les faisceaux d'énergie de perturbation dûs à l'effet de bord.

.°.

Dans le cas où on ignore l'épaisseur de la masse auscultée, on peut la calculer suivant la méthode décrite dans l'annexe.

Enfin, notons que cette méthode n'est valable que lorsque la

masse auscultée est homogène, pas de fissure ni de cavité. L'homogénéité d'une masse sera vérifiée par la méthode de "MESURE EN EVENTAIL" décrite dans l'annexe, ou par la méthode de mesure par transparence si celle-ci est possible, c'est-à-dire capteur et émetteur face en face.

-:-

BIBLIOGRAPHIE

-:-

(1) Manuel pratique de contrôleur par ultra-sons - Marie Jode Pinondel - Eyrolles - Editeur Paris.

(2) Ultrasonics - Benon Carlin - Mc Graw Hill Book Company.

(3) Annale de l'Institut technique du bâtiment et des Travaux Publics. Revue mensuelle juin 1970 - n°270.

(4) Etude vibratoire des pieux en béton. Annale de l'Institut technique du Bâtiment et des Travaux Publics, n°245 - mai 1968.

(5) Bulletin du Bureau de Recherches Géologiques et Minières n°3 - année 1966 - § Nature et Vitesse des Ondes observées en sismique Marteau, par Jean Paquet.

(6) Bulletin du Bureau de Recherches Géologiques et Minières n°3 - année 1967 - § Nature et Vitesse des ondes observées en sismique Marteau par Jean Paquet.

(7) Mécanique des milieux continus. Ondes de chocs en élasticité. Note de Monsieur Georges Duvant - Comptes-rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences. Groupe 2 - Mécanique pure et appliquée. Tome 261, n°15, 11 octobre 1965.

(8) La détection ultrasonique des défauts dans les métaux par B. Banks G.E. OLDFIELD - H. RAWDING - Eyrolles Editeur - Paris.

(9) Revue pratique de contrôle industriel - qualité n°32, septembre 1968.

(10) Dynamique générale des vibrations. (Y. ROCCARD) - Edition 1949, Masson et Cie.

(11) Les Ultrasons. Carlin traduit par Parmentier. Eyrolles Paris 1953.

(12) Théorie d'élasticité - Timoshenko - Mc GRAW HILL - 1936.

(13) Théorie des ondes Rayleigh - Mac Millan - 1877.

(14) Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées n° spécial J, juillet 1968.

-:-

A N N E X E

CONTROLE DE L'HOMOGENEITE D'UNE MASSE DE BETON PAR IMPULSIONS ULTRA-SONORES

- Mesure en éventail -

A - Mesure en éventail (homogénéité)

Le but de cette mesure est de vérifier l'homogénéité d'une masse de béton à deux faces libres, de localiser une cavité et de déterminer sa grandeur.

L'appareillage utilisé est la chaîne d'Auscultation Dynamique. Fixons l'émetteur en un point. Sur l'autre face, traçons une ligne droite passant (ou non) par le point d'aplomb $^{-}O^{+}$ de l'émetteur. Sur cette ligne, plaçons le capteur en des points équidistants dont les écartements sont en rapport avec l'épaisseur de la masse auscultée.

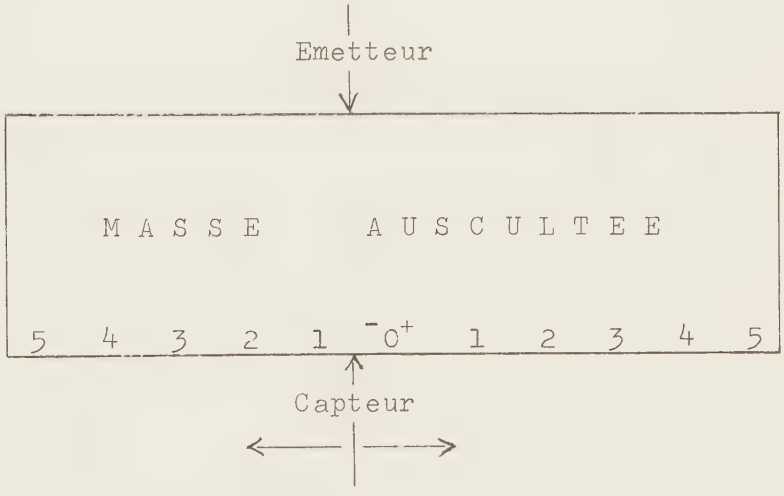


Fig. 12

Enfin, relevons le temps de réponse de toute position du capteur ; puis calculons les vitesses de propagation suivant chaque rayon-vecteur. Si la masse est homogène, on constatera que les vitesses propagées dans les rayons-vecteurs sont identiques. Au contraire, s'il existe une cavité dans la zone balayée par les rayons-vecteurs,

il y aura une perturbation et la vitesse s'abaissera brutalement ; puisque l'onde ne traverse pas la cavité, mais la contourne. En réalité le trajet de l'onde est plus long que le parcours présumé, c'est pourquoi la vitesse calculée diminue. La diminution de la vitesse calculée dépend du rapport du diamètre de la cavité à l'épaisseur de la masse auscultée.

Dans cette mesure il faut tenir compte de l'inclinaison des émetteur et capteur. Etant donné que les ondes longitudinales sont limitées dans un faisceau, si le capteur est trop éloigné de la position $^{-}O^{+}$ il faut incliner l'émetteur de telle manière que le capteur puisse recevoir des ondes longitudinales.

°°°

B - Calcul d'épaisseur de la masse auscultée (cf. figures page 58).

L'épaisseur de la masse auscultée est la plus courte distance de la source à la face opposée. Pour déterminer le point $^{-}O^{+}$, on emploiera une méthode ci-dessous :

Traçons une ligne droite horizontale sur la face qui contient le capteur. Mesurons les temps de réponse en différents points de cette ligne. Le point I qui donne le temps de réponse le plus court est le plus proche de l'émetteur. A partir de ce point, traçons une droite verticale et cherchons le temps de réponse minimum. Théoriquement ce point est le point d'aplomb $^{-}O^{+}$, mais dans la pratique il existe des erreurs de mesure. Donc, traçons une spirale serrée ayant ce point

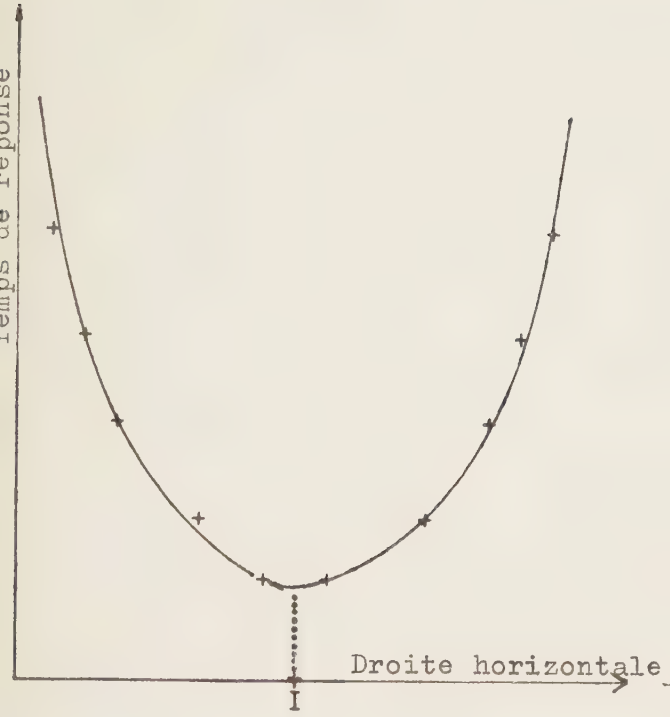


Fig. 13

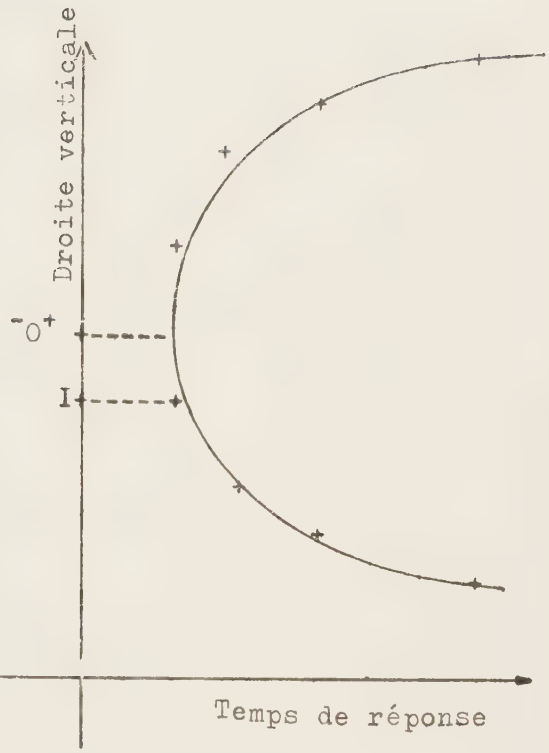


Fig. 14

comme centre et de rayon maximum de 20 cm. Remesurons les points de cette spirale, le point qui donne le temps de réponse minimum est le vrai point d'aplomb $^{-}O^{+}$.

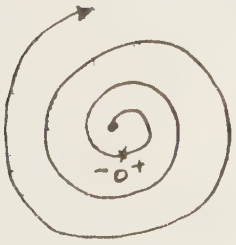


Fig. 15

Après avoir trouvé le point $^{-}O^{+}$ mesurons le temps de réponse :

- au point $^{-}O^{+}$ (ζ_o)
- au point M (ζ_M)

et la distance $\overline{OM}$ = h

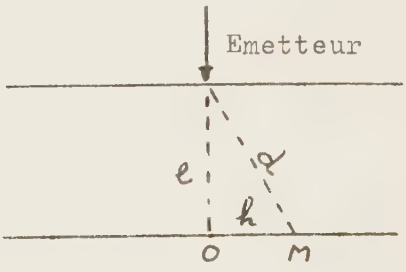


Fig. 16

Nous avons les relations ci-dessous :

$$d^2 = e^2 + h^2 \quad \text{(Pythagore)}$$

$$V_L = \frac{e}{\zeta_o} = \frac{d}{\zeta_M}$$

D'où nous tirons :

$$e = h \frac{\zeta_o}{\sqrt{\zeta_M^2 - \zeta_o^2}}$$

$$V_L = \frac{h}{\sqrt{\zeta_M^2 - \zeta_o^2}}$$

A partir de là, nous pouvons calculer la longueur d d'un rayon-vecteur quelconque et la vitesse suivant ce rayon-vecteur.

Finalement, rapportons ces résultats sur un graphique, l'abscisse représente la position du capteur et l'ordonnée représente la vitesse (ou le temps de réponse). Si la courbe a une allure continue, la zone auscultée est homogène. Au contraire si elle a une allure discontinue, la zone auscultée présente un obstacle (cavité, béton mal compacté etc ...).

°°°

Cette méthode nous permet non seulement de déterminer l'homogénéité d'une masse, de localiser l'obstacle, mais elle nous permet également de déterminer la grandeur d'une cavité en utilisant la longueur supplémentaire d'un trajet.

En effet, posons :

Φ : diamètre de la cavité

d_1 : parcours réel d'une onde longitudinale

d_c : parcours maximal qui contourne la cavité

d : parcours théorique (le plus court chemin)

V_L : Vitesse de propagation d'une onde longitudinale dans la zone saine

ζ : temps réel de réponse

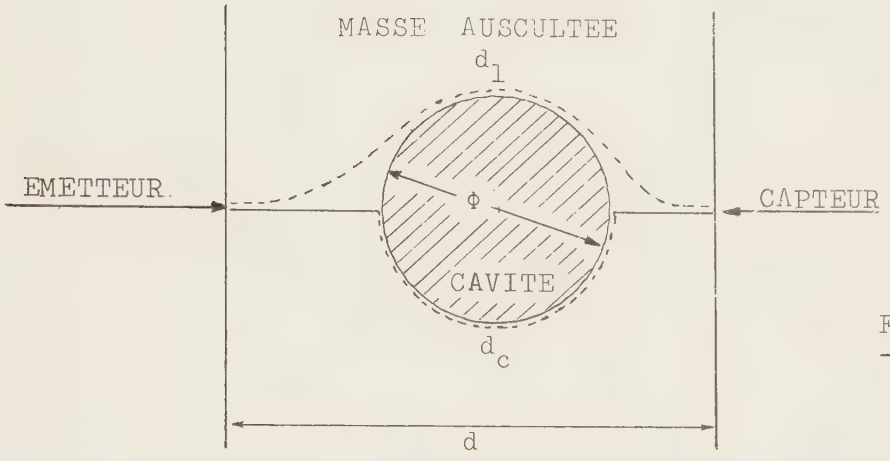


Fig. 17

nous avons :

$$d_1 = V_L \cdot \zeta$$

et

$$d_1 \leq (d - \Phi) + \frac{\pi}{2}\Phi \; (= d_c)$$

donc

$$\Phi \geq \frac{d_1 - d}{0{,}5708} = \frac{V_L \cdot \zeta - d}{0{,}5708}$$

C'est la limite inférieure d'une cavité. Sa limite supérieure sera déterminée par des rayons vecteurs tangents à la cavité qui ont une vitesse normale V_L.

Si la dimension de la cavité est trop petite on ne peut pas la détecter, car l'augmentation du temps de réponse sera confondue avec l'erreur de mesure.

UNIVERSITÉ DE PARIS VI
4, Place Jussieu - 75230 PARIS-CEDEX 05
SERVICE DE LA SCOLARITE
Bureau des Enseignements du 3e cycle
TÉLÉPHONE : 336-25-25 - 326-12-21

PERMIS D'IMPRIMER

DOCTORAT : DOCTEUR -INGENIEUR

THESE DE :

NOM : Monsieur HOANG

Prénoms : Duc -Phuong

né le 26 Février 19 32 à Cau Co Nam Dinh ~~Dépt~~ Vietnam

1ère THESE : " Mesure de la vitesse des ondes ultrasonores secondaires. Application dans le calcul des facteurs indispensables à la structure d'u ouvrage d'art.

2e THESE (Propositions faites par l'Université) :

PRESIDENT.M.JOFFRIN
EXAMINATEURS.M.ASTIER
M.ZAREMBOWITCH

ACADÉMIE DE PARIS
UNIVERSITÉ
PARIS
VI

Vu et Approuvé
PARIS, le 30 Mars 1973
Le Président
de l'Université de PARIS VI